SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Juraić

Zagreb, 2019. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj, dipl. ing.
Dr. sc. Martin Surjak, dipl. ing.

Student:

Matija Juraić

Zagreb, 2019. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru Kodvanju i asistentu Surjaku na vodstvu i pomoći oko ostvarivanja ovog rada. Nadalje, zahvaljujem se FSB Racing Teamu koji mi je ovo sve omogućio, a najviše svojoj obitelji koja me tokom cijelog studija podržavala i bodrila.

Matija Juraić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATIJA JURAIĆ** Mat. br.: 0035191119

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dimenzioniranje sendvič struktura te njihova primjena za izradu kompozitne šasije bolida Formule Student**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Sandwich structure design and their use in Formula Student composite chassis**

Opis zadatka:

Upotreba kompozitnih materijala u obliku sendvič struktura pokazala se kao vrlo učinkovit način smanjenja mase uz zadržavanje dobrih mehaničkih svojstava raznih nosivih konstrukcija kao npr. aviona, brodova i trkaćih automobila. Prilikom dimenzioniranja sendvič struktura, posebnu pozornost treba obratiti na mehanička svojstva jezgre i ljuski sendvič strukture.
Greške prilikom dimenzioniranja sendvič struktura s jedne strane mogu dovesti do loma pri manjim opterećenjima, a s druge strane do prevelike mase same konstrukcije.
U radu je potrebno eksperimentalno ispitati i odrediti krutost i čvrstoću pri savijanju uzoraka sendvič strukture različitih svojstava jezgre i ljuski. Računalnim simulacijama metodom konačnih elemenata potrebno je odrediti krutost uzoraka i analizirati uzroke loma pojedinih sendvič struktura.

Tijekom rada potrebno je:
1. Upoznati se s radom statičke kidalice i pripadajućeg upravljačkog programa.
2. Eksperimentalnim ispitivanjem savijanjem u tri točke odrediti krutost i čvrstoću uzoraka sendvič struktura. Progib uzoraka prilikom ispitivanja mjeriti bezkontaktno, upotrebom video-ekstenzometra.
3. U programskom paketu Abaqus, odrediti krutost pri savijanju kompozitnih uzoraka i predvidjeti uzrok loma pojedinih struktura.
4. Na osnovu rezultata računalnih simulacija i eksperimentalnog ispitivanja, odrediti broj slojeva u ljuskama za dobivanje najučinkovitijeg postava u vidu specifične krutosti i specifične čvrstoće sendvič strukture za svaki tip korištene jezgre.
5. Eksperimentalnim ispitivanjem savijanjem u tri točke ispitati testne ploče sendvič struktura u svrhu ispunjavanja zahtjeva pravilnika za izradu kompozitne šasije.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
15. studenog 2018.	17. siječnja 2019.	23. siječnja 2019. 24. siječnja 2019. 25. siječnja 2019.

Zadatak zadao:	Komentor:	Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Janoš Kodvanj	dr. sc. Martin Surjak	prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	MPa	Youngov modul elastičnosti
E_1	MPa	Youngov modul elastičnosti u smjeru osi x
E_2	MPa	Youngov modul elastičnosti u smjeru osi y
E_3	MPa	Youngov modul elastičnosti u smjeru osi z
v	-	Poissonov omjer
v_{12}	-	Poissonov omjer u ravnini xy
v_{13}	-	Poissonov omjer u ravnini xz
v_{23}	-	Poissonov omjer u ravnini yz
G_{12}	MPa	Modul smicanja u ravnini xy
G_{13}	MPa	Modul smicanja u ravnini xz
G_{23}	MPa	Modul smicanja u ravnini yz
E_f	MPa	Savojni modul elastičnosti
σ_f	MPa	Savojna čvrstoća
S	N/mm	Krutost pri savijanju
$\sigma_{t\ dop}$	MPa	Dopušteno tlačno naprezanje
$\sigma_{v\ dop}$	MPa	Dopušteno vlačno naprezanje
τ_{dop}	MPa	Dopušteno smično naprezanje
$\tau_{13\ dop}$	MPa	Dopušteno smično naprezanje u ravnini xz
$\tau_{23\ dop}$	MPa	Dopušteno smično naprezanje u ravnini yz
X_t	MPa	Vlačna čvrstoća sloja u smjeru vlakana
X_c	MPa	Tlačna čvrstoća sloja u smjeru vlakana

Y_t	MPa	Vlačna čvrstoća sloja u smjeru okomito na vlakna
Y_c	MPa	Tlačna čvrstoća sloja u smjeru okomito na vlakna
S_{12}	MPa	Smična čvrstoća sloja ojačanja u ravnini xy
L	mm	Razmak između oslonaca
l	mm	Duljina uzorka
b	mm	Širina uzorka
h	mm	Debljina uzorka
m	kg	Masa uzorka
Θ	°	Kut zakreta materijalne osi sloja ojačanja u odnosu na globalnu x os
I_f	-	Kriterij čvrstoće
R	-	Indeks popuštanja kompozita

SAŽETAK

U ovom radu prikazan je utjecaj mehaničkih svojstava jezgre i ljuski na mehanička svojstva cijele kompozitne sendvič konstrukcije. Sendvič konstrukcije različitih materijala jezgri i broja slojeva ojačanja u ljuskama ispitani su savijanjem u tri točke kako bi se izračunali iznosi specifičnog savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće. Za ocjenu svojstava sendvič konstrukcija u ovisnosti o njihovoj gustoći, izračunati su iznosi specifičnog savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće te je na temelju tih vrijednosti dana procjena broja slojeva za postizanje optimalnih svojstava s obzirom na korištenu jezgru. Krutost uzoraka osim eksperimentalnim ispitivanjem izračunata je i numerički putem računalnim simulacijama, zajedno s predviđanjem uzroka loma. U radu su objašnjene prednosti kompozitnih šasija u odnosu na čelične u kategoriji natjecanja Formula Student te je provedeno eksperimentalno ispitivanje kompozitnih uzoraka s ciljem ispunjavanja uvjeta pravilnika FS natjecanja za izradu kompozitne šasije.

Ključne riječi: kompozit, sendvič konstrukcija, savojna svojstva, kompozitna šasija

SUMMARY

This thesis shows the influence mechanical properties of the core and the shells have on the mechanical properties of the whole composite sandwich structure. 3-point-bend test has been conducted on sandwich structures of different core materials and number of layers in the shells in order to evaluate their flexural modulus of elasticity and bending strength. To properly evaluate each specimen's performance regarding its density, specific properties were calculated. Based on the specific properties of samples with different core materials, an optimal number of layers has been found. Bending stiffness and evaluation of the main cause of composite failure has been evaluated both experimentally and numerically by means of a simulation software. Thesis covers the advantages of using a composite chassis over its steel counterpart for use in Formula Student competition. The procedure of compulsory testing of the sandwich structures in order to pass the requirements set by the FS rules is also covered in this thesis.

Key words: composite materials, sandwich structure, bending properties, composite chassis

1. UVOD

Nosive konstrukcije strojeva, vozila te sportske i rekreacijske opreme dimenzioniraju se na način da zadovolje zahtjeve s obzirom na njihova mehanička svojstva, osiguravajući funkcionalnost i dugotrajnost sklopa u koji se ugrađuju. Primjenom tradicionalnih materijala, pravilno dimenzionirana konstrukcija može rezultirati velikom masom. U slučaju nosivih konstrukcija koje većinu vremena u eksploataciji provedu u dinamičkom okruženju, tj. gibanju, njihova masa ima veliki utjecaj na performanse sklopa u kojem se nalaze. Posebna skupina kompozita, koji se izrađuju od krutih ljuski odvojenih laganom jezgrom pokazuju vrlo dobru specifičnu krutost i čvrstoću. Takve prednosti sendvič konstrukcija uočene su u prvoj polovici 20. stoljeća i njihovo je korištenje bilo od tada sve učestalije. One su zaslužne za mnoga važna inženjerska postignuća, od kojih su najznačajnija ona u svemirskoj i zrakoplovnoj industriji. Unatoč tome što zamjena tradicionalne konstrukcije sendvič konstrukcijom u većini slučajeva rezultira manjom masom proizvoda, i dalje je potrebno obratiti pozornost na dimenzioniranje samog sendviča kako bi se ostvarile najbolje performanse.

U ovom radu provedeno je ispitivanje savojnih svojstava sendvič konstrukcija različitih postava i korištenih jezgri. Budući da svojstva kompozitnog materijala ovise o svojstvima njegovih konstituenata, provedena je analiza zavisnosti svojstava sendvič konstrukcije o različitim mehaničkim svojstvima jezgre i ljuski, kako bi se zakonitosti koje vrijede za mehaniku sendvič konstrukcija prikazale eksperimentalno, zajedno s optimalnim postavom uzorka za svaku jezgru.

U uvodnom poglavlju ovog rada opisane su glavne karakteristike i način proizvodnje sendvič konstrukcija zajedno s njihovim prednostima korištenja u odnosu na ostale materijale. Svrha njihove primjene u različitim granama industrije prikazana je primjerima iz literature. Drugo poglavlje tiče se mehaničkih svojstava sendvič konstrukcija te primjene u nosivim konstrukcijama trkaćih bolida. U trećem poglavlju prikazan je način izrade ispitnih uzoraka i objašnjene su pojedinosti o načinu ispitivanja. Ispitivanje savojnih svojstava provedeno je odgovarajućom opremom i metodama shodno dimenzijama ispitivanih uzoraka. Analiza rezultata dana je u četvrtom poglavlju. Zaključci su navedeni u petom poglavlju.

1.1 Sendvič konstrukcija

Sendvič konstrukcije predstavljaju jedno od najznačajnijih postignuća kompozitnih materijala u polju nosivih konstrukcija. Razlog primjene sendvič konstrukcije u industrijama poput zrakoplovstva, brodogradnje, svemirske industrije i motorsporta su njezine različite prednosti, od kojih su najvažnije [1]

- niska masa,
- visoka krutost,
- trajnost konstrukcije,
- integriranje više dijelova konstrukcije u jednu,
- mogućnost integracije zvučne i toplinske izolacije unutar jezgre.

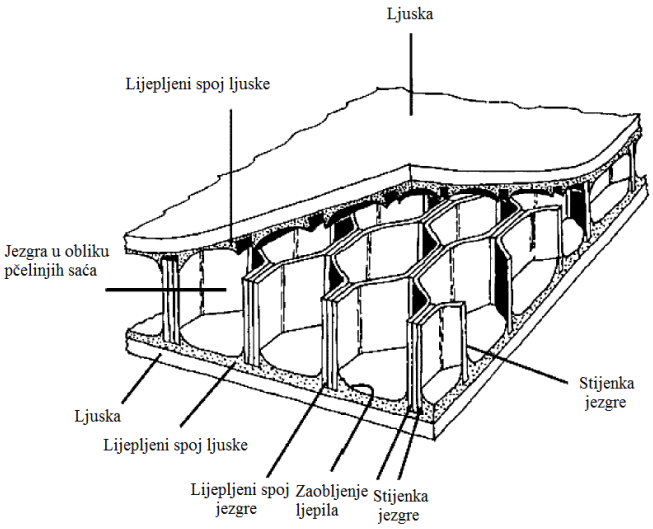
Sendvič konstrukcije definirane su kao konstrukcije ostvarene lijepljenjem dviju ljuski na vanjske površine laganog materijala ispune tj. jezgre [2]. Nastale su iz potrebe poboljšavanja mehaničkih svojstava običnih kompozitnih laminata kod opterećenja okomitog na njegovu površinu, primarno govoreći o savijanju. Budući da on pokazuju odlična svojstva u pri ravninskom opterećenju, logičan korak ka ostvarivanju boljih savojnih svojstava je povećanje momenta inercije poprečnog presjeka konstrukcije na način da se ljuske udalje jedna od druge te povežu odgovarajućim materijalom u sredini [3].

Kako bi se potvrdila važnost sendvič konstrukcija ne samo kao inženjerskog rješenja problema visoke mase konstrukcije, nego i u prirodi, dovoljno je pogledati oblik i sastav ljudskih i životinjskih kosti. Njezin vanjski dio je tvrd i krut, a u unutrašnjosti se nalazi materijal sličan pjeni. Upravo takva konstrukcija primjer je korištenja minimalne količine materijala u svrhu ostvarivanja dobrih mehaničkih svojstava [3].

Sendvič konstrukcije su prvu značajnu primjenu imale u Drugom svjetskom ratu kada je u SAD-u 1943. razvijen bombarder koji je za jezgru koristio saće napravljeno od staklenih vlakana te na drugim mjestima balzu, dok je za ljuske korišten polimer ojačan staklenim vlaknima. Tih godina napisan je i prvi znanstveni rad na temu sendvič konstrukcija s kojim je započelo istraživanje i razvoj takvih konstrukcija. Zrakoplovna i svemirska industrija u drugoj polovici 20.st. bile su glavni pokretač razvoja, sve dok sendvič konstrukcije nisu našle redovitu primjenu u ostalim industrijama kao: brodogradnja, željeznički promet, motorsport i ostale [3]. Što se tiče motorsporta, prvu kompozitnu šasiju od ugljikovih vlakana razvio je engleski tim McLaren 1981. godine za svoj bolid Formule 1. Osim što je bolid odlikovala niska masa i visoka torzijska krutost šasije, pokazao se vrlo sigurnim u slučaju nesreće [4].

Iako su i prije ovog bolida sendvič konstrukcije bile korištene za izradu šasija bolida, one su imale ljuske od aluminija, a ne polimera ojačanog vlaknima. Iz tog razloga ovaj auto označava prvu primjenu „moderne“ vrste sendvič konstrukcija, koja se kasnije pokazala revolucionarnom [5].

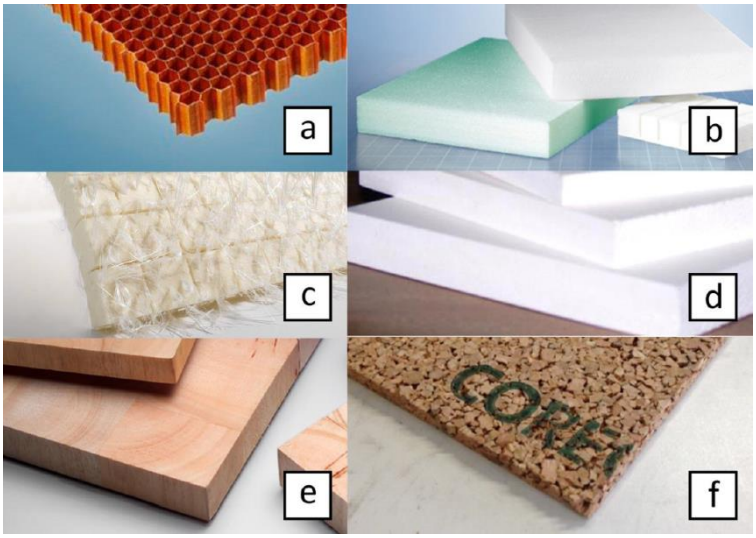
Slika 1. prikazuje detalje tipične sendvič konstrukcije koja koristi jezgru u obliku saća. Na slici je vidljiv lijepljeni spoj ljuske i jezgre koji je preduvjet za normalno funkcioniranje cijelog sendviča budući da osigurava njegov integritet. Također je vidljiva struktura saća koja je rezultat njezine proizvodnje, a to je u ovom slučaju postupak lijepljenja.



Slika 1. Sastav tipične sendvič konstrukcije [2]

1.2 Materijali korišteni za izradu sendvič konstrukcija

Tipične jezgre korištene za izradu sendvič konstrukcije prikazane su na slici 2.

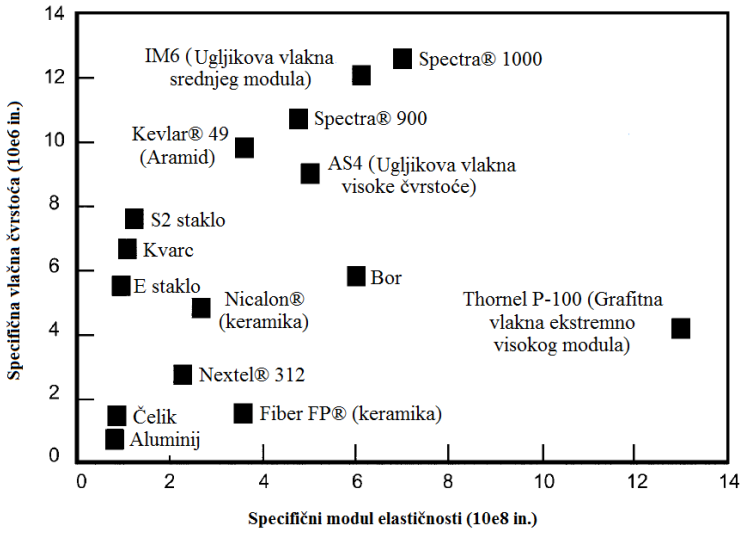


Slika 2. Tipični materijali jezgri sendvič konstrukcija: a) aramidno saće; b) PET pjena; c) SAN pjena ojačana vlaknima; d) PVC pjena; e) drvo balze i f) pluto [6]

Kako je u prethodnom poglavlju spomenuto, moderne sendvič konstrukcije visoke krutosti zahtijevaju primjenu krutih ljuski. One su najčešće sastavljene od duromerne matrice koja je ojačana s jednim ili više slojeva ojačala u obliku vlakana. Sustav matrice i ojačala može se ostvariti prilikom samog postupka izrade kompozita u kalupu korištenjem tzv. mokrog postupka (engl. wet-layup), a može biti i prethodno izvedeno korištenjem smole koja je predimpregnirana u sloj tkanja vlakana. Takvi sustavi nazivaju se preprezima. Da bi se slojevi kompozita laminiranog iz preprega mogli do kraja umrežiti, potrebno je postupak provoditi u peći ili u autoklavu. Prednosti korištenja preprega u odnosu na ručno laminiranje mokrim postupkom su sljedeće [2]

- idealan omjer smole i vlakana,
- manji udio šupljina,
- bolje stanje površine proizvoda,
- smanjeno vrijeme izrade.

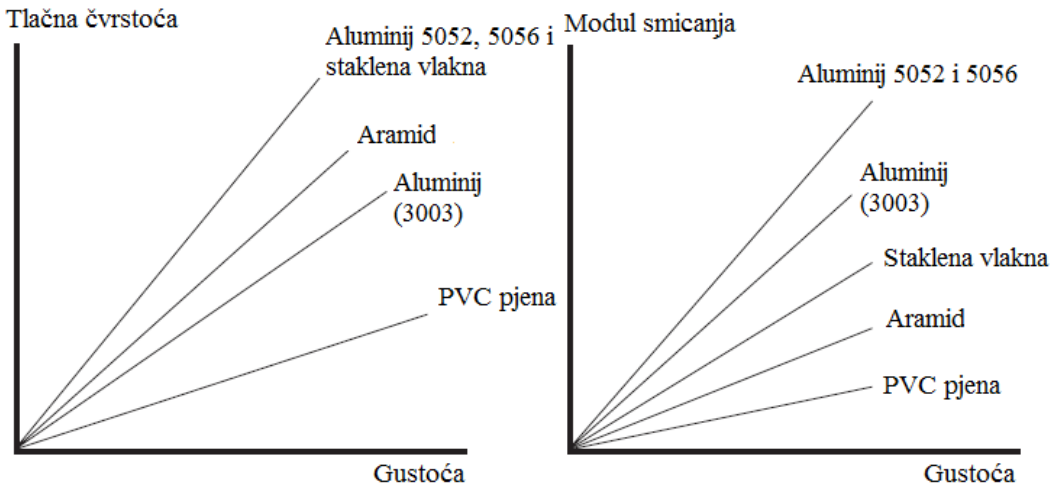
Ljuske sendvič konstrukcija kompozitni su materijal. Svaki kompozit sačinjavaju dva ili više materijala s ciljem dobivanja mehaničkih svojstava kakve ne posjeduje niti jedan materijal sam za sebe. Oni se sastoje od matrice i ojačala. Ojačalo može biti u obliku viskera, vlakana i žica. Kod kompozita ojačanih vlaknima, koji su predmet ovog rada, vlakna se mogu podijeliti prema materijalima od kojih su izrađeni, a to su: staklena, aramidna, poli-etilenska vlakna ultra visoke molekulske mase te ugljikova vlakna. Prilikom odabira vlakana potrebno je uzeti u obzir sva njihova mehanička svojstva, kao što su krutost, čvrstoća, žilavost itd. te ih usporediti sa zahtjevima konstrukcije. Na slici 3 trgovačkim nazivima prikazana su specifična mehanička svojstva različitih materijala vlakana [2]. Slika ujedno objašnjava zašto su ugljikova vlakna visoke čvrstoće jedno od najčešćih izbora za izradu kompozita visokih performansi.



Slika 3. Specifična krutost i čvrstoća različitih tipova vlakana [2]

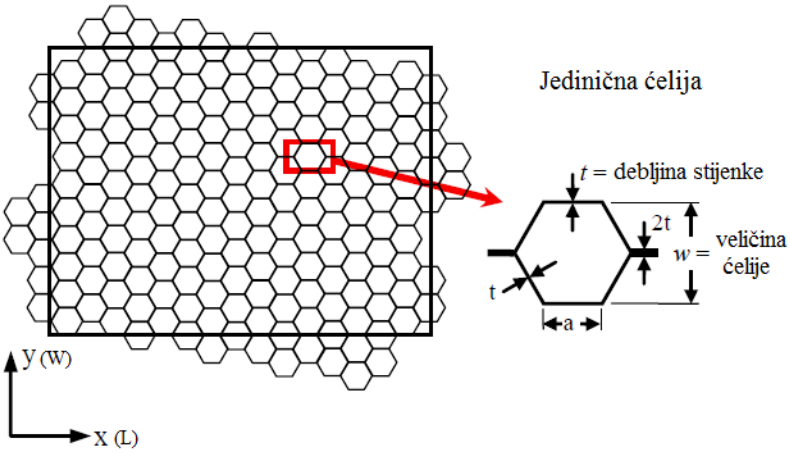
Duromerne matrice kompozita ojačanih vlaknima najčešće spadaju u jednu od sljedećih grupa [2]: poliesterska smola, vinilesterska smola, cijanat-esteri, epoksidna smola, fenolne smole, poliimidne matrice i bismaleimidi. Najbolja mehanička svojstva pokazuju poliimidne matrice i bismaleimidi, ali budući da su cjenovno vrlo nepristupačne svoju primjenu nalaze samo u posebnim slučajevima. Poliesterska smola je najčešće korištena, prvenstveno zbog cijene i zadovoljavajućih mehaničkih svojstava. Optimalni izbor kod primjene za izradu laminata dobrih mehaničkih svojstava i otpornosti na povišene temperature je epoksidna smola [2].

Najčešće korištene vrste jezgri su ploče sa strukturom saća i polimerne pjene. Jezgre u obliku saća imaju najbolja mehanička svojstva u odnosu na sve ostale tipove jezgri kao što je vidljivo na slici 4 [1].



Slika 4. Mehanička svojstva različitih materijala saća u odnosu na njihovu gustoću [1]

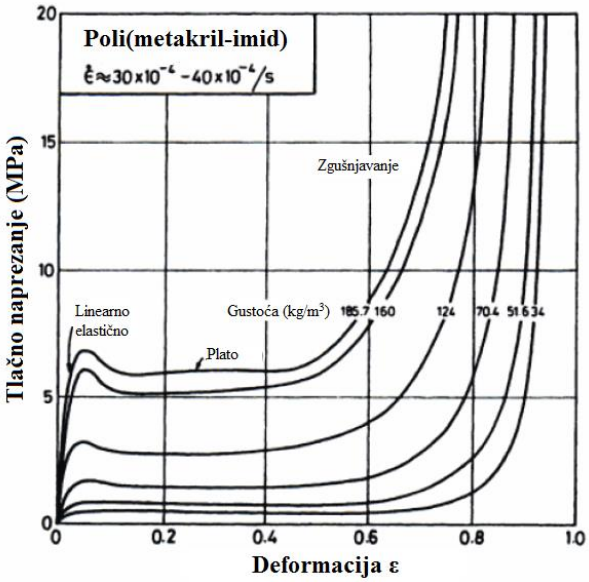
Najčešće korištene saće izrađuju se od aluminijevih legura te aramida. Aluminijsko saće pokazuje najbolju kombinaciju specifične čvrstoće i krutosti od svih materijala korištenih za ovu primjenu. Prednosti korištenja ovog tipa jezgre su: odlična mehanička svojstva, veliki izbor gustoća i veličine osnovne ćelije te toplinska otpornost. Nedostatak aluminijskog saća je njegova slaba korozijska otpornost u slučaju da u konstrukciji dođe do prodiranja vlage. Tokom godina proizvođači su uveli razne mjere zaštite od korozije kako bi se smanjila vjerojatnost korozije. Jedan od tih postupaka uključuje stvaranje zaštitnog oksidnog sloja uranjanjem u fosfornu kiselinu te nanošenje zaštitne prevlake korozijskog inhibitora. Tek nakon tog postupka nanosi se ljepilo na površine spojeva stijenki. Aramidno saće pokazuje vrlo dobru čvrstoću, ali krutost im je značajno manja od aluminijskog saća. Izrađuje se uranjanjem aramidnog papira u fenolnu smolu koja im daje svojstvo nezapaljivosti. Aramidno saće općenito je značajno skuplje od ostalih vrsta jezgri [2]. Jedna od loših strana jezgri u obliku saća napravljenih od bilo kojeg materijala je činjenica da pokazuju nejednaka savojna svojstva unutar xy ravnine, što je rezultat spajanja stijenki u samo jednom smjeru (osi x) prilikom proizvodnje. Iznosi modula smicanja (G_{13} i G_{23}) u tehničkim listovima proizvođača izraženi su zbog toga kao jedna vrijednost u smjeru L te druga (redovito manja) u smjeru W. Oznake L i W prikazane su na slici 5 te su standardan način označavanja x i y osi ovog materijala.



Slika 5. Jedinična ćelija saća [7]

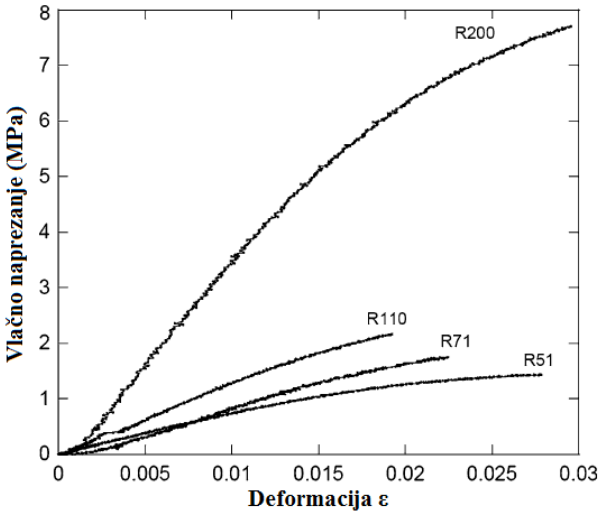
Polimerne pjene su polimerni materijali koji u sebi sadrže veliki udio šupljina. Šupljine mogu biti otvorene (nepravilne) i zatvorene (relativno pravilne). Oblik šupljina oko koje se nalazi jedinična ćelija, zajedno s gustoćom pjene najvažniji su utjecajni omjeri na njezina mehanička svojstva. Izrađuju se u obliku ploča različitih debljina. Postoji više tipova polimernih pjena, a to su: PS - polistiren, PU – poliuretan, PVC – poli(vinil-klorid), PET – poli(etilen-tereftalat),

UP – poliester i PMI – poli(metakrilimid). Najbolja mehanička svojstva od prethodno navedenih pjena imaju PMI pjene. Prilikom tlačnog opterećenja ćelije pjene se deformiraju sve dok se ne naslone na stijenku druge ćelije te tako naprezanje višestruko raste dok ne dođe do loma, kao što je prikazano na slici 6. [8].



Slika 6. Tlačna svojstva PMI pjena različite gustoće [8]

Kod vlačnog opterećivanja, pjena pokazuje brzi i krhki lom, kao što je prikazano na slici 7, za razliku od slučaja tlačenja, gdje je prisutno postupno drobljenje materijala [8].



Slika 7. Vlačna svojstva PMI pjena različite gustoće [9]

Ovako različito ponašanje materijala pri tlaku i vlaku rezultat je njegove ćelijaste strukture. Osim navedenih, za određene primjene kao što je brodogradnja koriste se jezgre napravljene od prirodnih materijala, kao što su drvo balze i cedra. Balza je prvi put primijenjena u sendvič

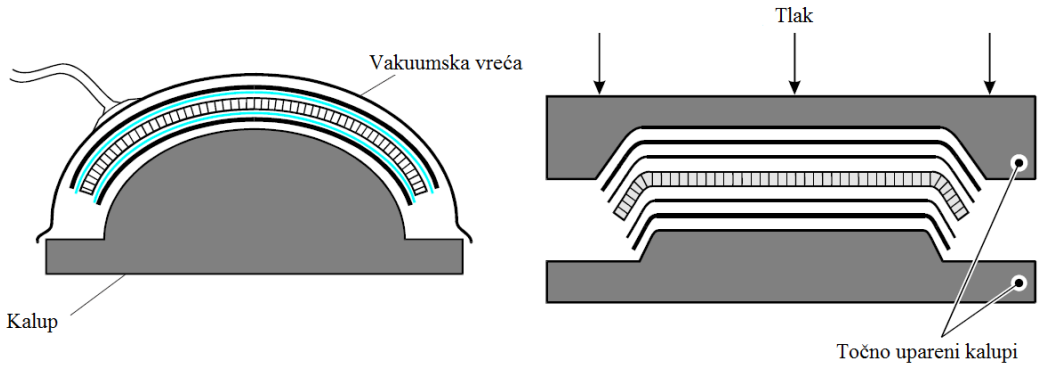
konstrukciji 40-ih godina prošlog stoljeća na hidroavionima gdje je u kombinaciji s aluminijskim ljuskama pokazala odlična tlačna svojstva. Balza je također vrlo dobar toplinski i zvučni izolator te ne pokazuje značajne deformacije pod utjecajem topline. Nedostatak jezgri napravljenih od prirodnih materijala je osjetljivost na vlagu koja vrlo brzo može pogoršati njena mehanička svojstva [10].

1.3 Proizvodnja sendvič konstrukcija

Proizvodnja sendvič konstrukcija može se podijeliti na dva načina s obzirom na redoslijed umrežavanja njihovih pojedinih dijelova [2]

1. izrada obje ljuske odvojeno te naknadno spajanje s jezgrom,
2. istovremeno umrežavanje ljuski i njihovo povezivanje s jezgrom (engl. „cocuring“).

Korištenjem prvog načina moguće je dobiti bolja svojstva ljuski budući da se prilikom njihovog umrežavanja može primjeniti visoki pretlak. Nedostatak ove metode je duže vrijeme izrade. Drugi način je isplativiji po pitanju utrošenog vremena na izradu sendvič konstrukcije. Ovaj način i dalje ostavlja mogućnost umrežavanja jedne ljuske odvojeno, što može sendvič konstrukciji dati bolje stanje površine zajedno s boljim mehaničkim svojstvima na jednoj strani proizvoda, što u nekim primjenama može biti velika prednost. Ovaj postupak sa sobom donosi i neke nedostatke u vidu nižeg dozvoljenog pretlaka (ovisno o korištenoj jezgri) te moguće pojave uzdužnog i poprečnog utiskivanja jezgre. Neki od postupaka istovremenog umrežavanja prikazani su na slici 8.

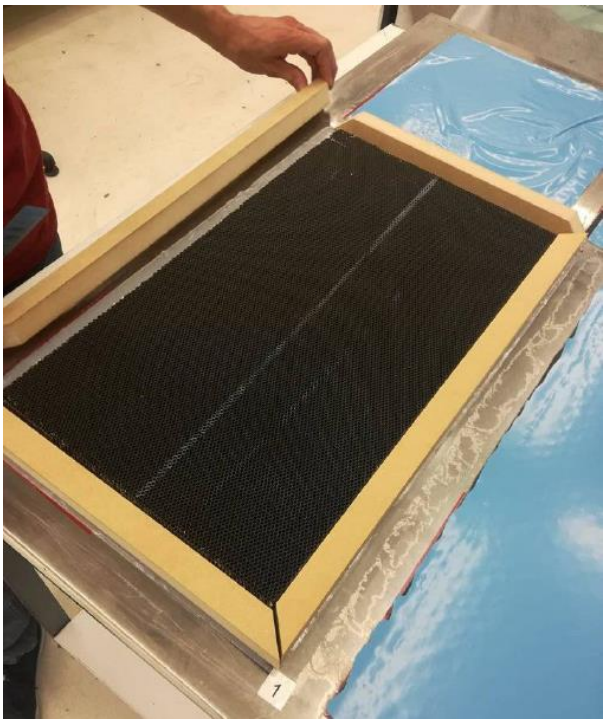


Slika 8. Tipični načini proizvodnje sendvič konstrukcija [1]

Prilikom izrade sendvič konstrukcija potrebno je obratiti pozornost na prikladnost korištene jezgre u postupku izrade koji se upotrebljava, npr. određene vrste strukturalne pjene nisu predviđene za izradu sendviča u autoklavu na visokim temperaturama. Aluminijsko saće prilikom bilo kojeg načina proizvodnje potrebno je na bočnim stranicama zaštititi od uzdužnog i poprečnog utiskivanja koje je prikazano na slici 9.

Slika 9. Uzdužno i poprečno utiskivanje jezgre [2]

Navedeni problem nastaje zbog zanemarivog modula elastičnosti saća u njihovom uzdužnom i poprečnom smjeru. Neki od jednostavnijih rješenja tog problema su: skošenje bočnih stranica jezgre (20° ili manje), dodatno prekrivanje bočnih stranica jezgre laminatom zajedno s njegovim pridržavanjem za podlogu odnosno kalup, ispunjavanje ćelija jezgre na rubnim područjima ljepilom [2]. Prilikom izrade ravnih ploča sendvič konstrukcija čije je ispitivanje opisano u ovom radu, jednostavan i jeftin način rješavanja problema utiskivanja je stavljanje zaštitnih letvica na bočne stranice jezgre te njihovo fiksiranje. Ovaj način prikazan je na slici 10. Zaštitne letvice se nakon toga mogu izrezati prilikom rezanja ploče na potrebnu mjeru.



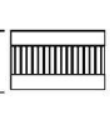
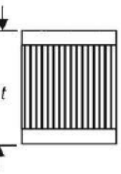
Slika 10. Mjera protiv utiskivanja jezgre stavljanjem zaštitnih letvica

2. MEHANIČKA SVOJSTVA I PRIMJENA

2.1 Mehanička svojstva sendvič kompozita

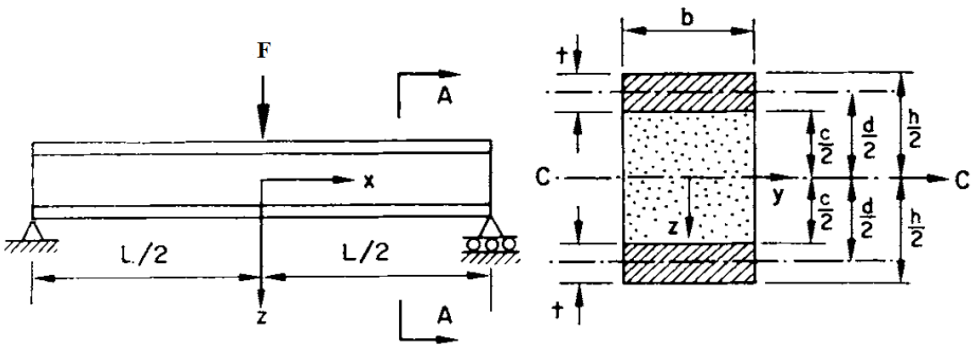
Kao što je bilo navedeno u prvom poglavlju, jedna od prednosti korištenja sendvič konstrukcija je poboljšavanje svojstava običnih laminata na opterećenja izvan njihove ravnine. Slika 11 pokazuje iznose savojne krutosti i čvrstoće kod različitih debljina jezgre. Iz ovoga je vrlo lako zaključiti zašto je sendvič konstrukcija dobar izbor, pogotovo u primjenama gdje je masa konstrukcije kritični parametar kojeg treba minimizirati.

Kako bi se bolje razumio utjecaj debljine jezgre na savojnu krutost, moguće je kroz nekoliko jednostavnih relacija raščlaniti utjecaj pojedinih komponenata sendvič konstrukcije na ponašanje pri savijanju.

	Puni materijal	Sendvič konstrukcija	Deblji sendvič
			
Krutost	1.0	7.0	37.0
Savojna čvrstoća	1.0	3.5	9.2
Masa	1.0	1.03	1.06

Slika 11. Mehanička svojstva sendvič konstrukcija [2]

Greda od sendvič konstrukcije prikazana na slici 12 sastoji se od dvije tanke ljuske debljine *t*, razdvojene jezgrom debljine *c*. Širina grede je označena s *b*, a njena ukupna visina iznosi *h*.



Slika 12. Savijanje grede sendvič konstrukcije [11]:

Poštivajući definiciju sendvič konstrukcije, uzima se da su sva tri sloja savršeno zalijepljena. Osim toga pretpostavlja se da jezgra posjeduje zanemarivu krutost u odnosu na ljuske sendviča, što je za većinu sendvič konstrukcija istina. Jezgra i ljuske su izotropni materijali u ovim relacijama [11]. Za prvu aproksimaciju, naprezanja i progib grede se mogu izračunati klasičnom teorijom savijanja, koja se temelji na pretpostavci da presjeci grede okomiti na uzdužnu os zadržavaju svoj oblik prilikom savijanja grede. Navedena teorija sadrži poznatu relaciju iz Nauke o čvrstoći između duljine grede *L*, progiba *f*, sile *F*, te krutosti *EI* koja glasi [12]

$$f = \frac{F}{EI}\frac{L^3}{48}. \tag{2.1}$$

Ako se uzme u obzir da je sendvič konstrukcija heterogenog presjeka pa je njena savojna krutost *EI* zbroj krutosti ljuski i jezgre, izmjerena oko težišta poprečnog presjeka grede. Ako se krutost *EI* označi kao *D*, tada krutost iznosi [11]

$$D = EI = E_f\frac{bt^3}{6} + E_f\frac{btd^2}{2} + E_c\frac{bc^3}{12}, \tag{2.2}$$

gdje su E_f i E_c moduli elastičnosti ljuski i jezgre, a *d* udaljenost između simetrala ljuski [11]

$$d = \frac{h+c}{2}. \tag{2.3}$$

U ovom primjeru pretpostavlja se da je greda uska, pa je naprezanje u smjeru osi y jednako nuli. U jednadžbi 2.2 prvi član predstavlja krutost ljuski oko njihove vlastite osi simetrije, drugi član predstavlja krutost ljuski oko osi simetrije cijele grede, dok treći član predstavlja krutost jezgre. Analiziranjem dimenzijskih odnosa unutar jednadžbe 2.2, može se zaključiti da će drugi član u većini sendvič konstrukcija biti dominantan, jer su kod prvog člana ljuske tanke i imaju malu krutost oko svoje vlastite osi, a za treći član vrijedi činjenica da jezgra obično ima višestruko manju krutost od ljuski, pa je tada moguće napisati [11]

$$D = E_f\frac{btd^2}{2}. \tag{2.4}$$

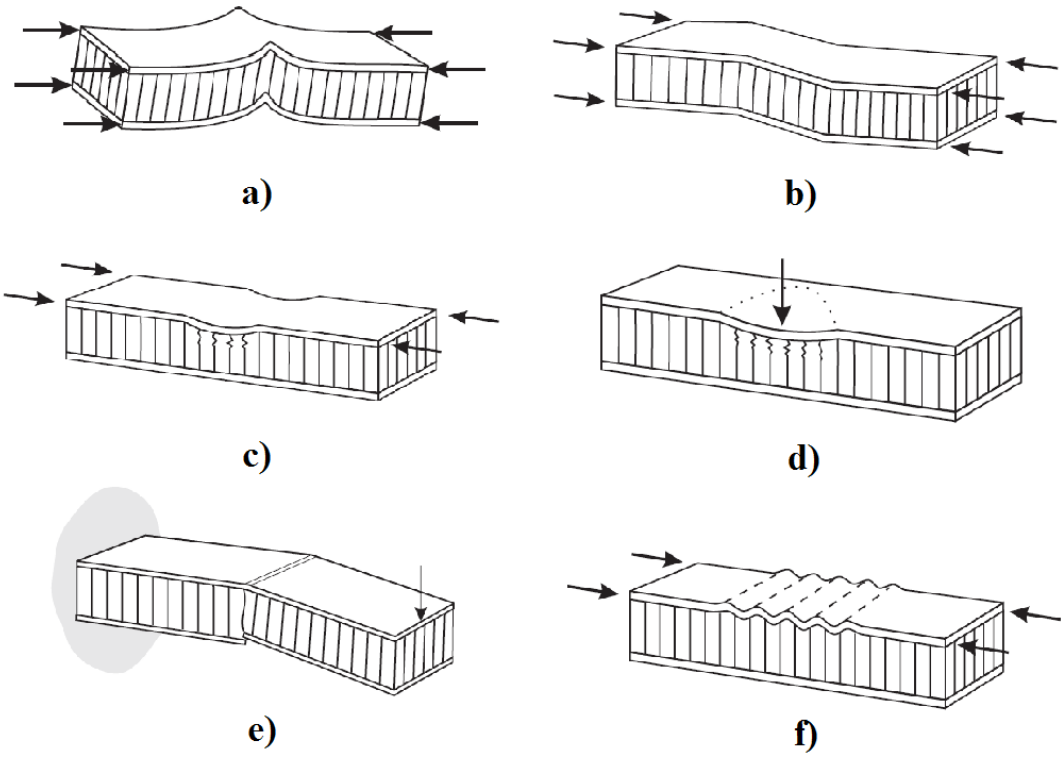
Ako se jednadžba 2.4 uvrsti u jednadžbu savijanja 2.1 dobiva se izraz

$$f = \frac{FL^3}{24E_f btd^2}. \tag{2.5}$$

Navedeni izraz ima vrlo dobru točnost ukoliko su sve spomenute pretpostavke istinite za proučavanu sendvič kostrukciju [11]. Prilikom dimenzioniranja stvarnog sendviča, elastične konstante pojedinih komponenti treba razmatrati zajedno s vrijednostima njihove čvrstoće. Prethodno spomenuti odnos između elastičnih konstanti jezgre i ljuski jedan je od čimbenika

koji određuju način pucanja sendvič konstrukcije. Rezultati ispitivanja u ovom radu međuostalim će prikazati važnost tog odnosa. Sendvič konstrukcije za razliku od tradicionalno korištenih materijala imaju više različitih načina lomova, ali svaki od tih načina je specifičan te daje konstruktoru do znanja koji je primarni uzrok takvog ponašanja konstrukcije prilikom opterećenja.

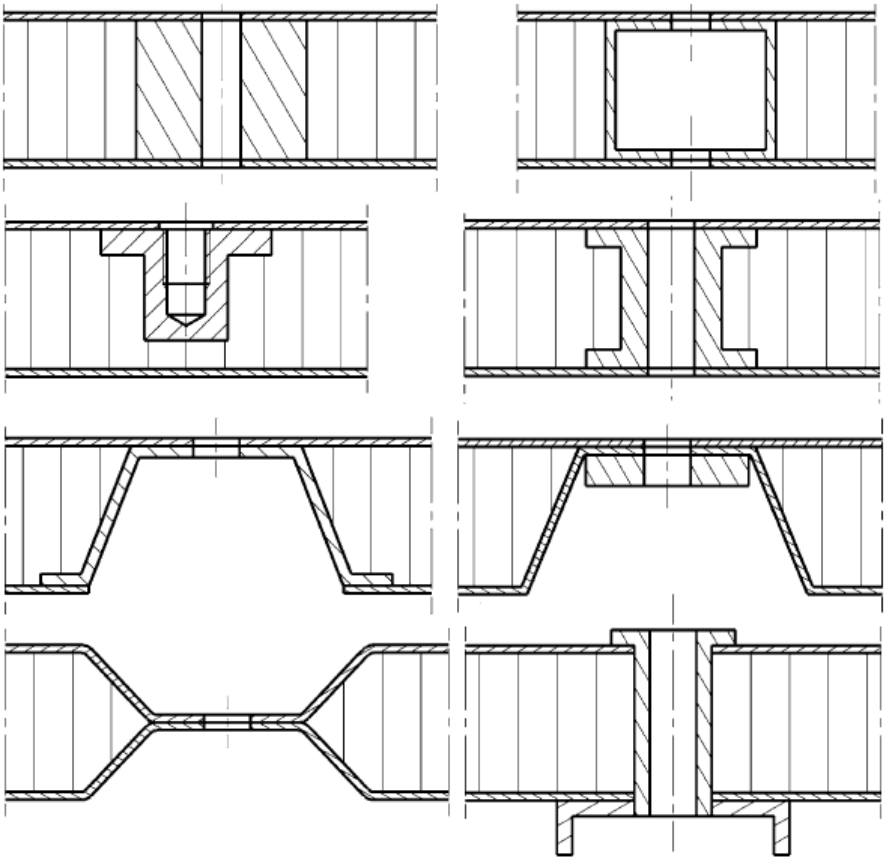
Tipični načini popuštanja sendvič konstrukcija prikazani su na slici 13. Sendviči a) i b) prikazuju načine izvijanja sendvič struktura u slučaju kada jezgra nije dobro dimenzionirana. Dolazi do izvijanja zbog premale debljine jezgre ili zbog njenog preniskog modula smicanja. Sendvič c) pokazuje udubljenje ljuske uzrokovano nedovoljnom krutošću ljuske i čvrstoće jezgre. Sendvič d) pokazuje utiskivanje jezgre zbog nedovoljne tlačne čvrstoće jezgre. Sendvič e) pokazuje popuštanje donje ljuske zbog previsokih tlačnih naprezanja uslijed savijanja. Sendvič f) pokazuje nabiranje gornje ljuske uslijed korištenja prevelike jedinične ćelije saća [1].



Slika 13. Tipični načini pucanja sendvič konstrukcija [1]

2.2 Opterećenje sendvič konstrukcija

Sendvič konstrukcija opterećena je putem umetaka koji su najčešće pozicionirani u samom sendviču prije procesa njegovog sklapanja. Umetak je dio konstrukcije namijenjen spajanju sendvič konstrukcija ili prihvaćanju drugih dijelova konstrukcija. Sastoji se od dva dijela, jedan je fiksni, a drugi se može po potrebi skidati. Dio koji se može skidati najčešće je vijak ili neki drugi dio s navojem koji se može uvrtati u fiksni dio odnosno umetak. Umetak je povezan sa sendvič konstrukcijom lijepljenim spojem [13]. Najčešće korišteni umeci prikazani su na slici 14.



Slika 14. Varijante umetaka za sendvič konstrukcije [14]

Umetci se dijele na tri glavne skupine [13]

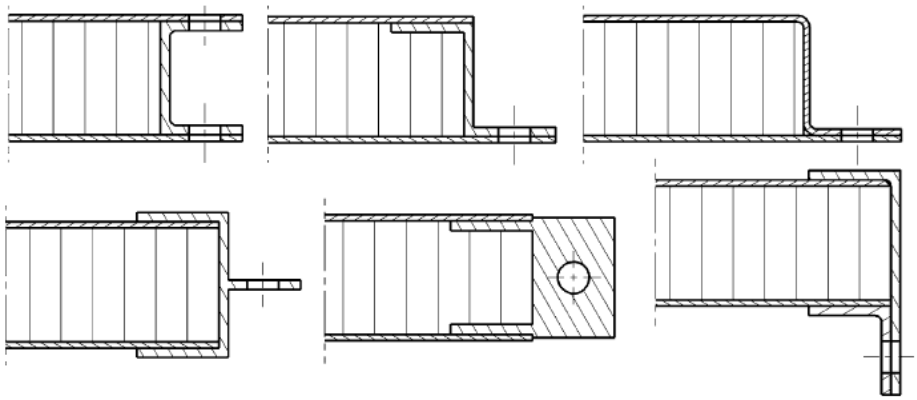
- umetci koji se povezuju sa sendvič konstrukcijom prilikom njene izrade,
- umetci spajani nakon izrade sendviča korištenjem strukturalnog ljepila,
- umetci namjenjeni direktnom stezanju ili uvratnju u postojeći sendvič.

Prva grupa umetaka mora se precizno pozicionirati prilikom izrade sendviča, što predstavlja izazov te u većini slučajeva dimenzijska točnost nakon postupka izrade nije zajamčena.

Unatoč tome, ovakvi umetci povezani su vrlo dobro s osnovnim sendvičem, te je vrijeme utrošeno na njihovu izradu manje nego kod ostalih što je njihova velika prednost [13].

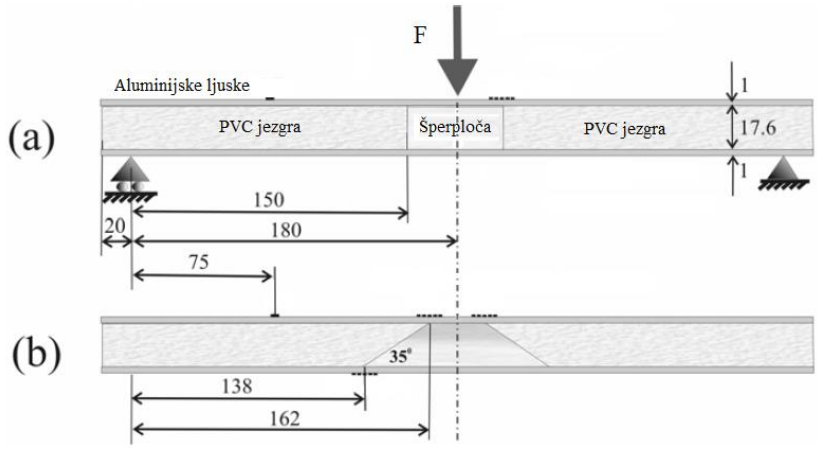
Druga grupa umetaka može se postaviti preciznije na osnovnu sendvič konstrukciju budući da se oni postavljaju naknadno. Sklop umetka izveden je na način da on ne prenosi opterećenja samo lijepljenim spojem već i samim oblikom, što mu uvelike povećava nosivost [13].

Treća grupa umetaka nema direktnu povezanost s jezgrom, neprilagodljivi su različitim debljinama jezgri te se sile i momenti prenose samo lijepljenim spojem [13]. Ukoliko je sile i momente potrebno unijeti u sendvič konstrukciju na njenom samom završetku, to se postiže korištenjem različitih profila ili oblikovanjem ljuski kao što je prikazano na slici 15.



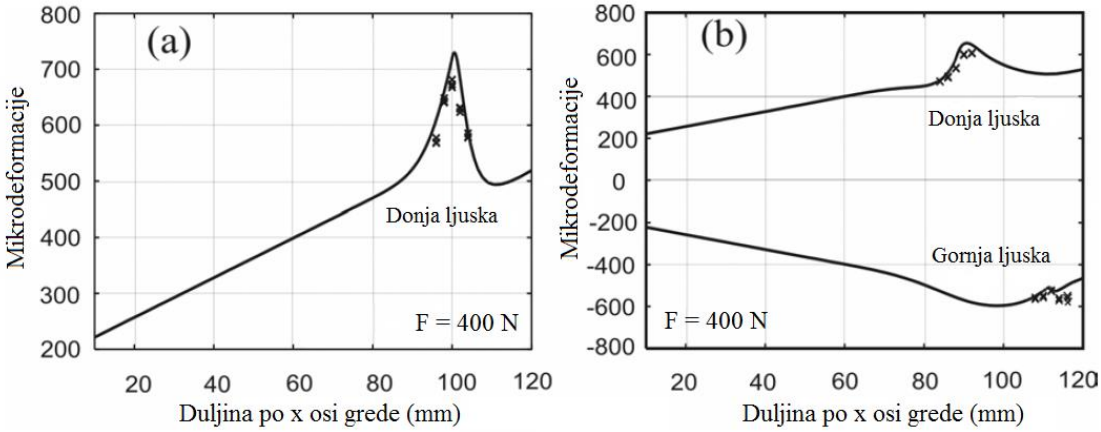
Slika 15. Varijante završetaka sendvič konstrukcija za prihvat opterećenja [14]

Budući da su umetci lokalna nepravilnost u strukturi samog sendviča te osim toga imaju značajno veću krutost od okolne jezgre, pojava koncentracije naprezanja na njegovim rubovima je očekivana i nepoželjna. U radu [15] prerdstavljen slikom 16 prikazana je sendvič konstrukcija kao greda opterećena na savijanje putem umetka na njezinoj sredini.



Slika 16. Grede s različitim tipovima umetaka pri savijanju [15]

Proučavan je utjecaj oblika umetka na koncentraciju naprezanja, a samim time i deformacija na spoju umetka s originalnom jezgrom sendviča. Deformacije su mjerene tenzometarskim trakama. Rezultati ispitivanja prikazani na slici 17 pokazuju značajno manje izražene lokalne deformacije na rubu skošenog umetka. Iz ovog rada vidljiv je utjecaj oblika umetka na čvrstoću sendviča.



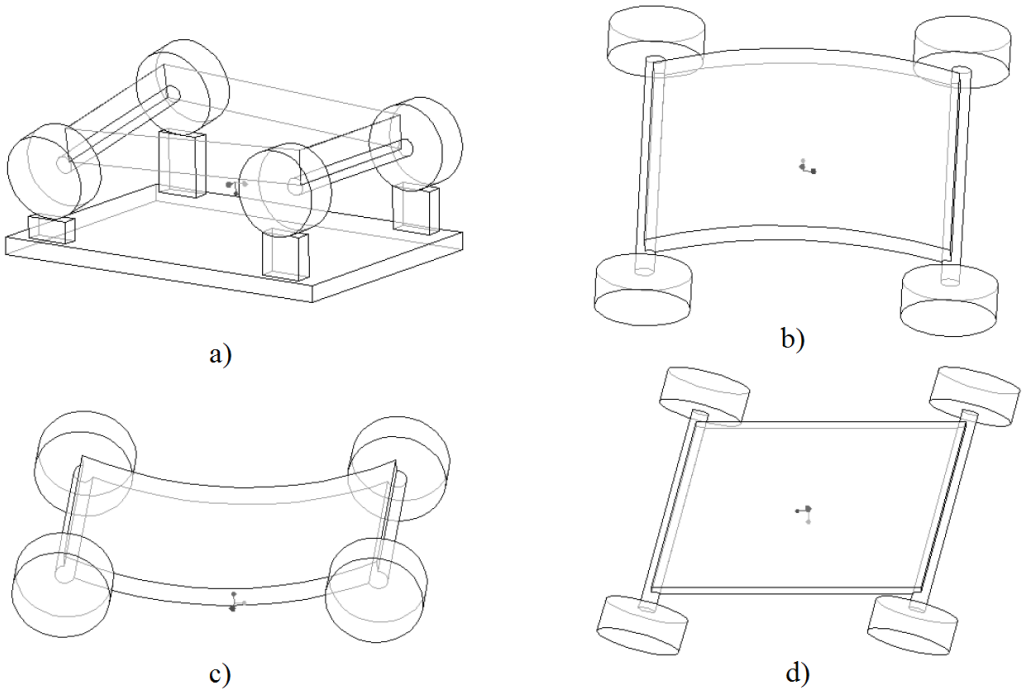
Slika 17. Mikrodeformacije na prijelaznom području umetka i jezgre [15]

2.3 Primjena sendvič konstrukcija u Formuli Student

Formula Student je natjecanje namijenjeno studentima strojarstva iz cijelog svijeta. Smisao natjecanja je izraditi bolid prema određenim pravilima te biti ocijenjeni kao tim od strane iskusnih sudaca koji rade u auto industriji ili su na neki način dio motorsporta. Tim koji se uspije kvalificirati za neko od natjecanja sudjeluje u statičkim i dinamičkim disciplinama natjecanja. Kako bi tim mogao pristupiti natjecanju, potrebno je uspješno riješiti ispite znanja te ispuniti sve zahtjeve pravilnika za izradu bolida. To uključuje provjeru analitičkog proračuna šasije i sigurnosnih dijelova bolida. Statičke discipline uključuju prezentaciju poslovnog plana, troškovnik auta i prezentaciju konstrukcijske izvedbe bolida. Dinamičke discipline uključuju mjerenje vremena vožnje u krug, utrku ubrzanja, autokros, utrku izdržljivosti i mjerenje učinkovitosti. Svaka disciplina ima svoj način bodovanja te sveukupni uspjeh predstavlja zbroj bodova svake discipline. FSB Racing Team je prvi osnovan hrvatski tim Formule Student, s tradicijom od 2004. godine. Najbolji ostvareni rezultat postignut je 2014. godine u Engleskoj na stazi Silverstone kada je tim ostvario 10. mjesto od sveukupno 97 natjecatelja. Na slici 18 prikazan je prošlogodišnji bolid FSB-RT05R („StrixR“) na natjecanju u Češkoj.

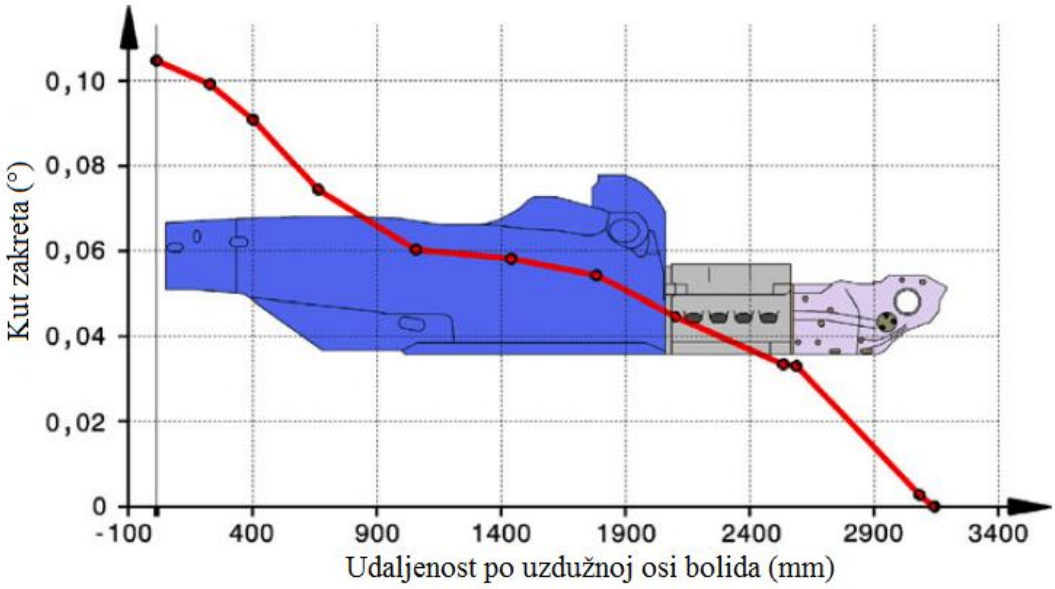
Slika 18. Bolid FSB Racing Teama FSB-RT05R

Slikom 19 prikazane su skalirane deformacije šasije uslijed tipičnih dinamičkih opterećenja na stazi. Slika 19 a) pokazuje uzdužno uvijanje šasije zbog prelaska prednje osovine preko neravnina na cesti koje uzrokuju značajan moment torzije na šasiju. Torzijska krutost je najvažnije svojstvo dobre šasije. Slika b) prikazuje bočno savijanje šasije uslijed centrifugalnih sila prilikom skretanja. Slika c) prikazuje vertikalno savijanje šasije uslijed dinamičke kompresije bolida ili uzdužne preraspodjele opterećenja uslijed intenzivnog kočenja ili ubrzavanja. Slika d) prikazuje uzdužnu distorziju šasije uzrokovanu nejednakim uzdužnim opterećenjem kotača (kočenje s jednom stranom bolida na drugačijoj podlozi i sl.) [16]



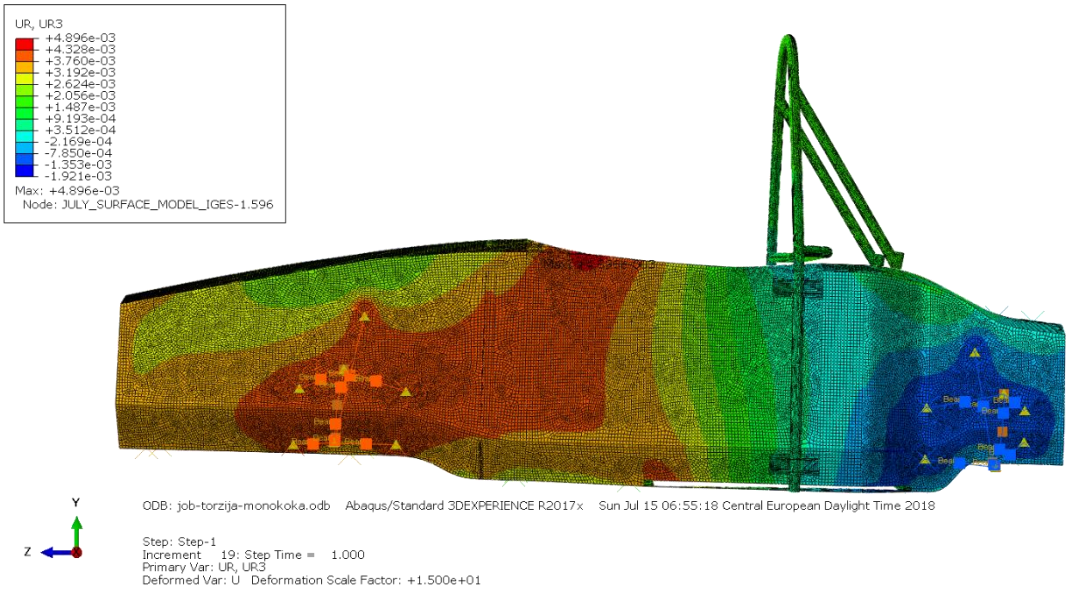
Slika 19. Tipična opterećenja šasije bolida [16]

Torzijska krutost šasije glavni je pokazatelj kakve se performanse od nje mogu očekivati prilikom dinamičkih opterećenja koja se očekuju na stazi. Slika 20 prikazuje iznose kuta zakreta oko uzdužne osi za trkaći bolid Formule 1 prilikom opterećenja na torziju. Ovaj dijagram vrlo jasno upućuje na mjesta gdje su najveće promjene u kutu zakreta, koje označavaju mjesta s manjom krutosti. Konkretno u ovom primjeru to su prednji dio monokok šasije i kućište mjenjača na stražnjem dijelu [14].



Slika 20. Kut zakreta šasije prilikom uzdužnog torzijskog opterećenja [14]

FSB Racing Team 2017. godine odlučio se razviti svoju prvu kompozitnu monokok šasiju trkaćeg bolida Formule Student. Iako su bolji europski timovi već prešli na takav tip nosive konstrukcije, mogućnost izrade nečeg sličnog u FSB Racing Teamu pojavila se tek nedavno budući da zahtjeva velike novčane resurse i mogućnost korištenja autoklava. Prethodnih godina razvijane su tradicionalne cijevne šasije, ali te su generacije već usavršile cijevnu šasiju pa napredak nije bio moguć. Kompozitna monokok šasija nudi značajno bolju specifičnu krutost za razliku od cijevne šasije te se zato odlučilo na njen razvoj. Monokok šasija izrađivat će se iz sendvič konstrukcije čije su ljuske polimer ojačan ugljikovim vlaknima, a jezgra aluminijsko saće. Prilikom razvoja monokok šasije za budući bolid FSB Racing Teama, provodile su se računalne simulacije s tipičnim opterećenjima, kako bi se zaključilo gdje se konstrukcija može unaprijediti. Jedna od iteracija u razvoju šasije prikazana je na slici 21 gdje su analizirani kutevi zakreta šasije u odnosu na njezinu uzdužnu os prilikom opterećenja na torziju. Analiza je provedena računalnim simulacijama korištenjem metode konačnih elemenata. Na slici su vidljive značajne rotacije kod početka otvora kokpita. To je bio rezultat nagle promjene polarnog momenta tromosti presjeka šasije u tom području te se nakon toga pristupilo promjenama geometrije modela monokoka na cijeloj bočnoj strani šasije zajedno s otvorom kokpita što je rezultiralo značajno povoljnijom konstrukcijom.



Slika 21. Iterativni razvoj monokok šasije bolida FSB-RT06E pomoću računalnih simulacija

Korištenje računalnih simulacija u ovom slučaju je vrlo korisno zato što je moguće na relativno lagan način kvantificirati promjene u geometriji modela ili postavu sendviča. Monokok je za vrijeme pisanja ovog rada i dalje u fazi razvoja, ali rezultati računalnih simulacija torzijske krutosti su obećavajući.

3. MATERIJALI I METODE

U ovom radu ispitana su savojna svojstva sendvič konstrukcija. Ispitivani su uzorci s tri različita materijala jezgre, od kojih je svaki izrađen s različitim brojem slojeva ugljikovih vlakana u ljuskama. Ispitivanja su provedena eksperimentalno i numerički računalnim simulacijama. Svojstva sendvič konstrukcija su dobivena provođenjem ispitivanja savijanjem u tri točke. Na temelju eksperimentalnih rezultata odabran je optimalan postav sendvič konstrukcije u vidu specifičnih svojstava izračunatih prema kriterijima mase uzoraka. Numerički rezultati uspoređeni su s eksperimentalnim s ciljem procjene točnosti korištenog simulacijskog modela u vidu mehaničkih svojstava i uzroka loma sendvič konstrukcije.

3.1 Numeričko ispitivanje računalnim simulacijama

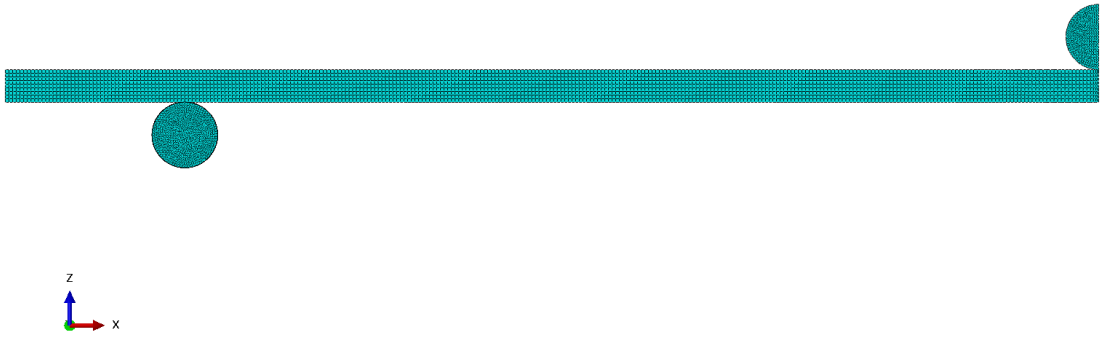
Numeričko ispitivanje provedeno je računalnim simulacijama temeljenim na metodi konačnih elemenata. Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja je široko prihvaćena u industriji gdje je postala nezaobilazni dio razvoja proizvoda i strojnih dijelova. Metoda se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma na određen broj konačnih elemenata. Programski paketi namijenjeni implementaciji ove metode u sebi sadrže različite tipove konačnih elemenata, što korisniku nudi mogućnost rješavanja praktički bilo kojeg inženjerskog problema na relativno jednostavan način.

U ovom radu korišten je programski paket Simulia Abaqus/CAE 2018 u svrhu računalnih simulacija savijanja kompozitnih sendvič struktura. Simulacije su provedene pomoću Abaqus/Standard rješavača uz pretpostavku linearno elastičnih svojstava materijala bez definiranja inicijacije i propagacije oštećenja kompozita budući da je primarni cilj numeričkog dijela rada odrediti krutost i uzrok nastajanja loma uzorka.

3.1.1 Opis numeričkog modela

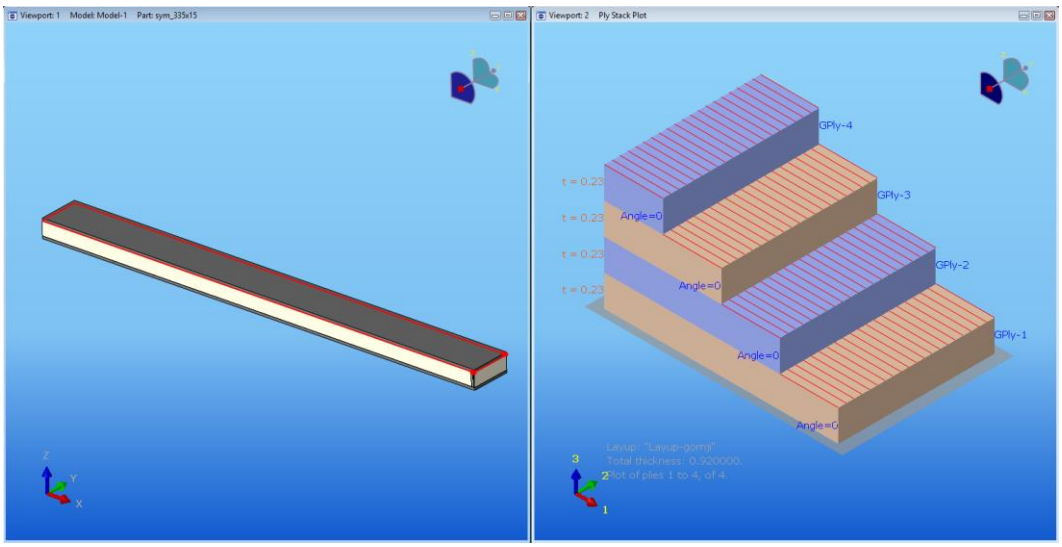
Numerički odnosno simulacijski model prikazan je na slici 22. U modelu je iskorišteno svojstvo simetrije promatranog problema, budući da se na taj način znatno smanjuje potreban broj diskretizacijskih odnosno konačnih elemenata. Prilikom analize rezultata računalne simulacije cijeli model može se zrcalno prikazati u odnosu na ravninu pozicioniranu pomoću određenog koordinatnog sustava. Budući da je tražena izlazna vrijednost ovih simulacija zapravo krutost uzoraka pri savijanju S, mjerena je sila reakcije u smjeru osi Z u ovisnosti o pomaku aplikatora sile u istoj osi. Prilikom računanja spomenute krutosti uzorka odnosno člana $\Delta F/\Delta s$ u formuli (4.1), potrebno je silu reakcije aplikatora pomnožiti s dva, budući da je

model simetričan te predstavlja samo polovicu od cijelog modela. Sličan model korišten je i u izvoru [6]. Nakon izračunate krutosti, svim uzorcima je dodatno izračunat savojni modul elastičnosti koji je uspoređen s eskperimentalnim rezultatima.



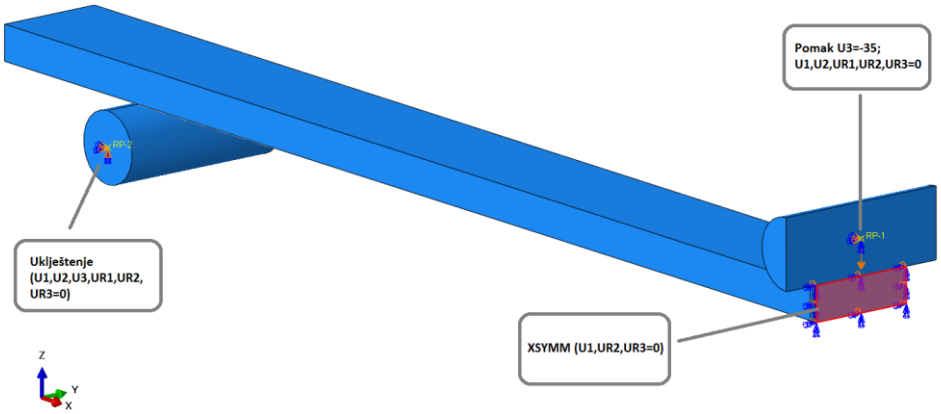
Slika 22. Simulacijski model za proračun metodom konačnih elemenata

Simulacijski model sastoji se od ispitnog uzorka, oslonca i aplikatora sile. Model ispitnog uzorka predstavlja samo jezgru sendvič konstrukcije, zato što je ona modelirana pomoću volumnih konačnih elemenata, konkretno elemenata oblika heksaedra s osam čvorova (C3D8R). Ljuske sendvič konstrukcije modelirane su pomoću površinskih elemenata (S4R) formiranih na gornjoj i donjoj površini jezgre pomoću funkcije „Create skin“. Njima je tada zadan postav slojeva ugljikovih vlakana pomoću funkcije „Composite layup“. Primjer zadanog postava, u ovom slučaju $[0F_4]_s$ prikazan je na slici 23.



Slika 23. Prikaz zadanog postava u programskom paketu Abaqus

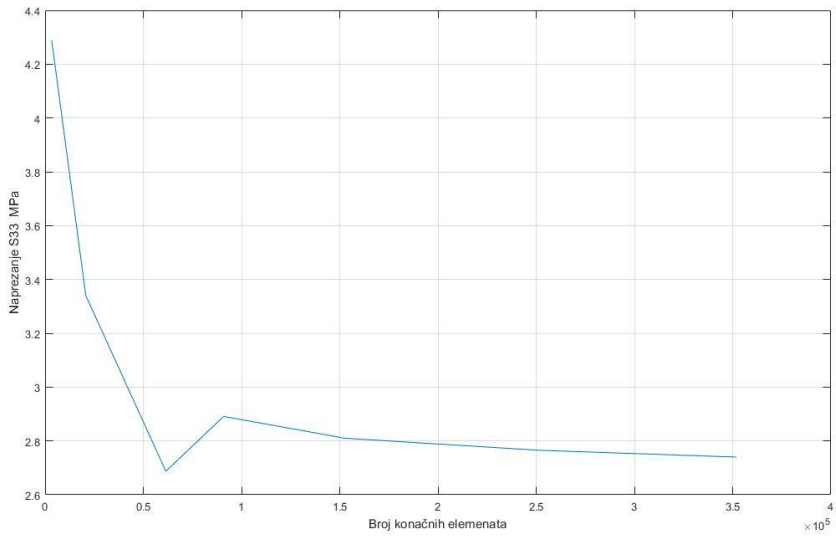
Oslonac i aplikator sile definirani su kao nedeformabilna tijela funkcijom „Rigid body“ te je svakom dodijeljena referentna točka. Rubni uvjeti prikazani su na slici 24.



Slika 24. Rubni uvjeti

Kontakti između uzorka, oslonca i aplikatora sile su definirani kao „surface-to-surface“ kontakti, s faktorom trenja 0,13 [17].

U simulacijskom modelu korišteno je 152649 konačnih elemenata. Taj broj izabran je na temelju analize konvergencije normalnog (u smjeru osi z) naprezanja na području sendvič konstrukcije gdje dolazi do kontakta s aplikatorom sile. Osim ovog kriterija, promatran je i progib sendvič konstrukcije uz konstantnu silu te je i on konvergirao na isti način kao i naprezanje prikazano na slici 25.



Slika 25. Analiza konvergencije rješenja

Mehanička svojstva materijala korištena kao ulazne vrijednosti za definiranje materijala u programskom paketu Abaqus prikazana su u tablicama 1 do 4. Jezgra je definirana kao izotropan materijal u slučaju strukturalne pjene, a u slučaju saća podaci su upisani preko inženjerskih konstanti za ortotropan materijal. Slojevi ugljikovih vlakana definirani su pomoću šablone „Lamina“.

Tablica 1. Mehanička svojstva materijala jezgre korištena za numeričku analizu [24]

	E MPa	ν[1]	$\sigma_{t\,dop}$ MPa	$\sigma_{v\,dop}$ MPa	τ_{dop} MPa
Rohacell 51 IG-F	70	0,311	0,9	1,9	0,8
Rohacell 110 IG-F	160	0,311	3	3,5	2,4
Rohacell 200 SL	371	0,311	9,6	11,7	4,8

Tablica 2. Mehanička svojstva[2] aluminijskog saća [19]

	E_1 MPa	E_2 MPa	E_3 MPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} MPa	G_{13} MPa	G_{23} MPa
Aluminijsko saće 5052-1/8-3.1	1	1	517,11	0	0	0	0,5	310,26	151,68

Tablica 3. Čvrstoća aluminijskog saća razreda 5052-1/8-3.1 [19]

	$\sigma_{t\,dop}$ MPa	$\tau_{13\,dop}$ MPa	$\tau_{23\,dop}$ MPa
Aluminijsko saće 5052-1/8-3.1	2,07	1,45	0,90

[1] Poissonov omjer za ovaj materijal preuzet je iz izvora [8]

[2] Vrijednosti E3,G13,G23 dostupni su u tehničkom listu proizvoda te imaju glavni utjecaj na rezultate simulacije. Saće nije namijenjeno prenošenju sila u smjerovima E1,E2 i G12 i zato iznosi nisu specificirani od strane prozvođača. Iz tog razloga su ovdje uzeti kao vrlo male vrijednosti. Vrijednosti Poissonovih omjera preuzeti su iz literature [1].

Tablica 4. Mehanička svojstva slojeva ojačanja korištenih za numeričku analizu

	T300 3K [2x2] twill [20]	T700 12K [2x2] twill [21]	T700 24K UD [22]
E_1 MPa	55200	54750	124500
E_2 MPa	55200	54750	9100
ν_{12}	0,05	0,042	0,3
G_{12} MPa	4000	4000	3940
G_{13} MPa	3000	3500	3940
G_{23} MPa	3000	3500	3370
X_t MPa	645	771,98	2575
X_c MPa	615	698,16	1235
Y_t MPa	645	771,98	40
Y_c MPa	615	698,16	182
S_{12} MPa	69,8	132,57	85,7

Prilikom analiziranja rezultata računalnih simulacija kompozitnih materijala potrebno je odabrati odgovarajući kriterij popuštanja budući da slojevi kompozitnog laminata imaju izrazito anizotropna mehanička svojstva. Programski paket Abaqus nudi nekoliko kriterija popuštanja, a to su [23]

- kriterij najvećih naprezanja,
- kriterij najvećih deformacija,
- Tsai-Hill kriterij,
- Tsai-Wu kriterij,
- Azzi-Tsai-Hill kriterij,
- Hashinov kriterij.

Prve dvije teorije čvrstoće su najjednostavnije i korisne su samo kod jednoosnih opterećenja. Sljedeća tri kriterija popuštanja pokazuju svoje prednosti u slučajevima kada je laminat opterećen u više smjerova istovremeno. Hashinov kriterij u sebi sadržava četiri različita načina popuštanja kompozitnog materijala (vlačno i tlačno popuštanje matrice te vlačno i tlačno popuštanje vlakana) te osim toga nudi mogućnost definiranja kriterija inicijacije i propagacije oštećenja ukoliko to problem zahtjeva. Za sve navedene teorije važno je napomenuti kako one u svojim relacijama koriste komponente naprezanja transformirane u

koordinatni sustav samog sloja ojačanja. Glavna materijalna os sloja, oznake 1 zarotirana je za kut Θ u odnosu na globalnu x os modela ili nekog drugog, naknadno definiranog koordinatnog sustava. Kut Θ zadaje se prilikom definiranja postava u modulu „Composite layup“. Razlike u kriterijima popuštanja prikazane su u tekstu niže gdje su za primjer uzeti kriterij najvećeg naprezanja i Azzi-Tsai-Hill kriterij [23].

Kriterij najvećeg naprezanja objašnjen je relacijama (3.1) do (3.3),

$$Ako\ je\ \sigma_{11} > 0, onda\ X = X_t\,; inače\ X = X_c \tag{3.1}$$

$$Ako\ je\ \sigma_{22} > 0, onda\ Y = Y_t; inače\ Y = Y_c \tag{3.2}$$

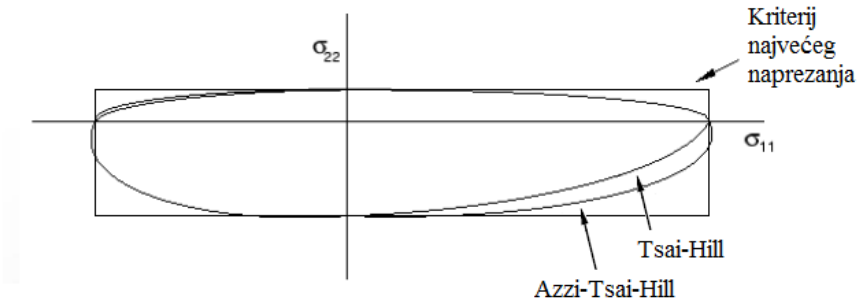
a uvjet čvrstoće I_f kompozita tada glasi

$$I_F = \max\left(\frac{\sigma_{11}}{X}, \frac{\sigma_{22}}{Y}, \left|\frac{\sigma_{12}}{S}\right|\right) < 1. \tag{3.3}$$

Azzi-Tsai-Hill kriterij objašnjen je relacijom (3.4)

$$I_F = \frac{\sigma_{11}^2}{X^2} - \frac{|\sigma_{11}\sigma_{22}|}{X^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2} < 1, \tag{3.4}$$

gdje je vidljiv odnos između pojedinih komponenta naprezanja, za razliku od kriterija popuštanja najvećeg naprezanja, gdje među njima ne postoji nikakva zavisnost. Usporedba kriterija popuštanja pomoću njihovih krivulja čvrstoće za dvoosno stanje naprezanja prikazana je na slici 26:



Slika 26. Usporedba krivulja čvrstoće raznih kriterija popuštanja kompozita [23]

Nakon uključivanja potrebne izlazne varijable (CFAILURE) Abaqus prikazuje vrijednost indeksa popuštanja *R* za sve kriterije popuštanja kompozita. Odnos između kriterija čvrstoće i indeksa popuštanja opisan je relacijom (3.5). Ukoliko točka unutar krivulje čvrstoće na slici 26 opisuje trenutno stanje naprezanja, tada inverz indeksa popuštanja označava udaljenost od ruba krivulje čvrstoće, odnosno faktor sigurnosti kompozita [23].

$$\left\{\frac{\sigma_{11}}{R}, \frac{\sigma_{22}}{R}, \frac{\sigma_{12}}{R}\right\} \Rightarrow I_F = 1 \tag{3.5}$$

Analiza preliminarnih rezultata simulacija u ovom radu pokazala je da su razlike između indeksa popuštanja između svih navedenih teorija neznatne, budući da je kompozit opterećen uglavnom jednoosno (gornja ljuska na tlak, a donja na vlak u smjeru osi x). Iz tog razloga kao indeks popuštanja prilikom analize rezultata koristit će se Azzi-Tsai-Hill.

3.2 Eksperimentalno ispitivanje

Eksperimentalna ispitivanja provedena su s ciljem utvrđivanja razlike između savojnih svojstava uzoraka različitih jezgri i postava. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje. U radu su obrađena ispitivanja uzoraka sendvič konstrukcija prema normi DIN EN ISO 14125 i čine glavni dio ovog rada. Osim navedenih, ispitivani su i uzorci većih ploča sendvič konstrukcija vezano uz izradu kompozitne šasije Formula Student bolida, čije je ispitivanje provedeno na Građevinskom fakultetu.

3.2.1 Izrada uzoraka

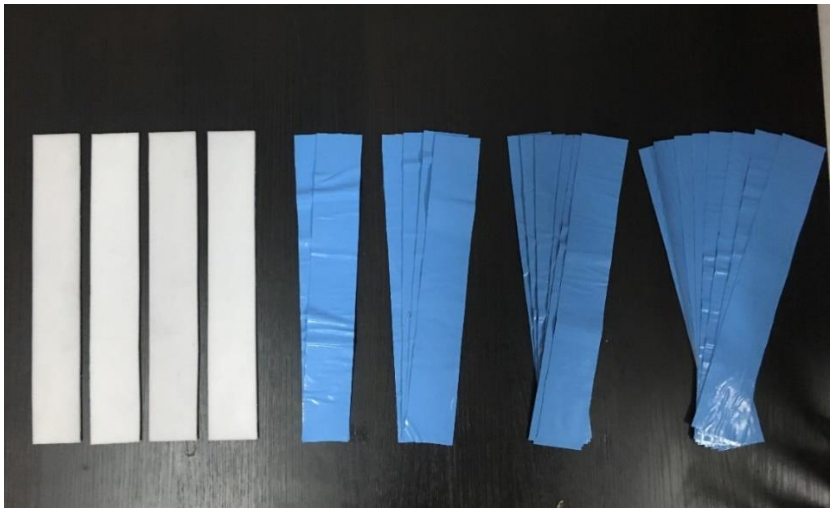
Uzorci su izrađeni u prostorijama FSB Racing Teama gdje se nalaze potrebni strojevi i oprema za izradu ovakvih kompozitnih tvorevina. Korištena su tri različita tipa krute strukturalne pjene kao materijal jezgre. Radi se o pjeni zatvorenih ćelija na bazi poli(metakril-imid) plastomera koju proizvodi njemačka tvrtka Evonik Industries AG pod trgovačkim nazivom Rohacell. Proizvođač nudi materijal u nekoliko različitih verzija, od kojih je svaka optimizirana za određenu primjenu, a unutar svake verzije materijala nude nekoliko gustoća koje su označene brojem u njihovom nazivu.

Debljina svih jezgri je bila ista i iznosila je 5 mm. Ljuske sendviča izrađene su od ugljikovih vlakana predimpregniranih epoksidnom smolom, odnosno tzv. prepreg materijala. Prednosti laminiranja prepregom u odnosu na klasični postupak ručnog laminiranja opisan je u prvom dijelu rada. Ispitni uzorci podijeljeni su u tri glavne skupine, prema vrsti jezgre

1. R51,
2. R110,
3. R200.

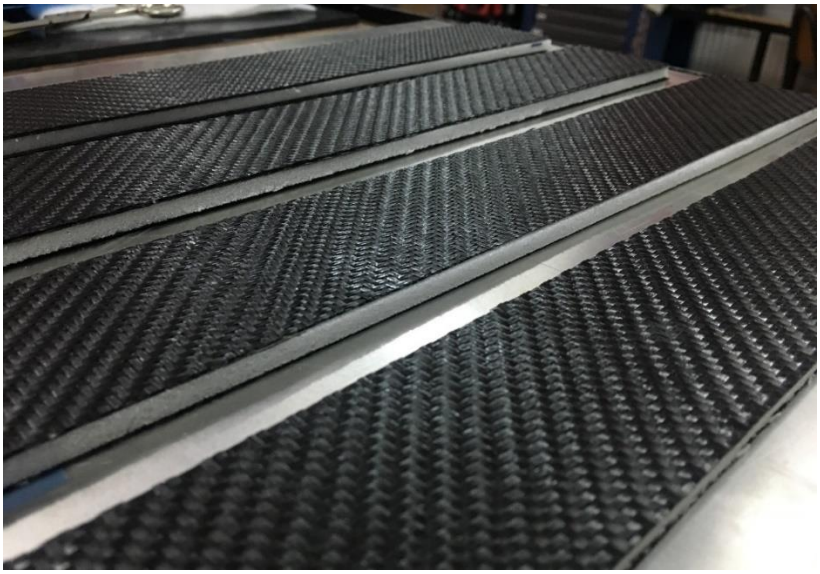
Svaka skupina uzoraka dalje je podijeljena na 4 razreda prema broju slojeva ojačanja u svakoj ljuski, gdje svaki sljedeći razred ima jedan sloj ojačanja po ljuski više od prethodnog pa je uzorak označen na sljedeći način: R51-C1, R51-C2, itd. tvoreći ukupno 12 različitih uzoraka. Budući da je svaki razred ojačanja izrađen u 3 primjerka kako bi se poništio utjecaj rasipanja vrijednosti savojnih svojstava, ukupno je izrađeno i ispitano 36 uzoraka.

Postupak izrade započinje izrezivanjem potrebnih komada jezgri i preprega. Prepreg materijal zahtjeva skladištenje na -18 °C u zatvorenim polietilenskim vrećama te je važno prilikom svakog korištenja tj. odmrzavanja, ostaviti materijal određeno vrijeme u svojoj vreći na sobnoj temperaturi kako bi se postupno zagrijao i izbjegla kondenzacija vlage na materijalu. Izrezani uzorci jezgre i prepreg materijala za prvu skupinu uzoraka (jezgre 51 IG-F) prikazani su na slici 27.



Slika 27. Izrezani materijali za izradu prve skupine uzoraka

Nakon pripreme osnovnog materijala, pristupilo se samom laminiranju uzoraka. Kao podloga za laminiranje koristila se aluminijska ploča, da uzorci prilikom vakumiranja zadrže ravan oblik. Na ploču se prije laminiranja nanio sloj odjeljivača tj. voska koji je omogućio jednostavno odvajanje uzoraka nakon pečenja. Na slici 28 prikazani su nalaminirani uzorci prije vakumiranja.



Slika 28. Uzorci tijekom izrade

Nakon toga preko uzoraka stavljenj je sloj vakuum vreće koji je poslužio kao odjeljivač tj. tzv. „release film“. Preko cijele ploče potom je stavljen sloj tzv. „breather“ tkanine koji služi jednolikom distribuiranju vakuuma po cijeloj ploči tj. uzorcima. Nakon toga pristupilo se izradi vakuum vreće. Po obodu vreće stavljena je zaptivna traka pomoću koje je zalijepljena na ploču. Na jednom rubu ploče vreća je ostavljena otvorena kako bi se vakuumska cijev mogla spojiti i zabrtviti zaptivnom trakom. Ploča s uzorcima spremna za vakumiranje prikazana je na slici 29.

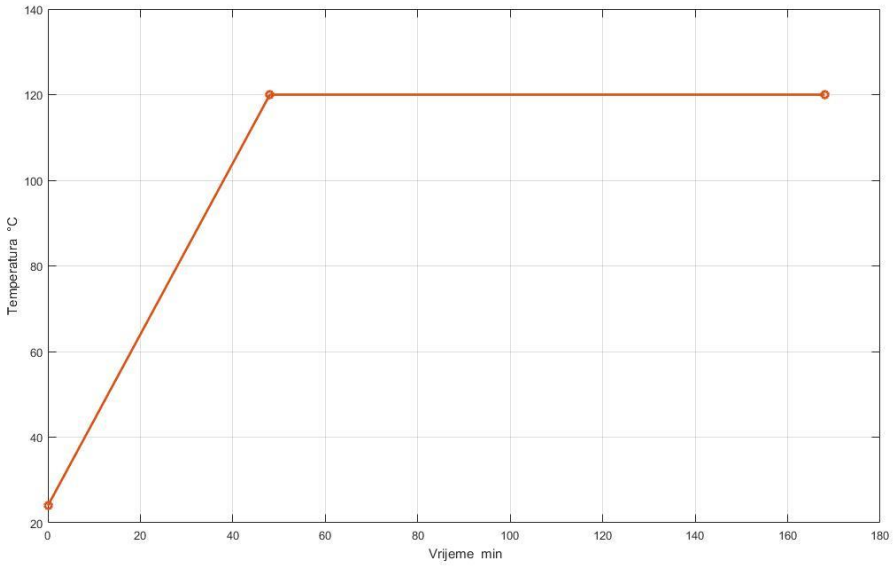
Slika 29. Uzorci spremni za postupak pečenja

Nakon što je ploča s uzorcima pripremljena, na nju je spojen vakuumski sustav, tj crijevo koje je integrirano u samu peć. Vakuum vreća je potom provjerena zadržava li vakuum te je, nakon toga uključena peć kako bi se započelo s režimom pečenja. Uzorci pod vakuumom, spremni za pečenje prikazani su na slici 30.

Slika 30. Vakumiranje uzoraka

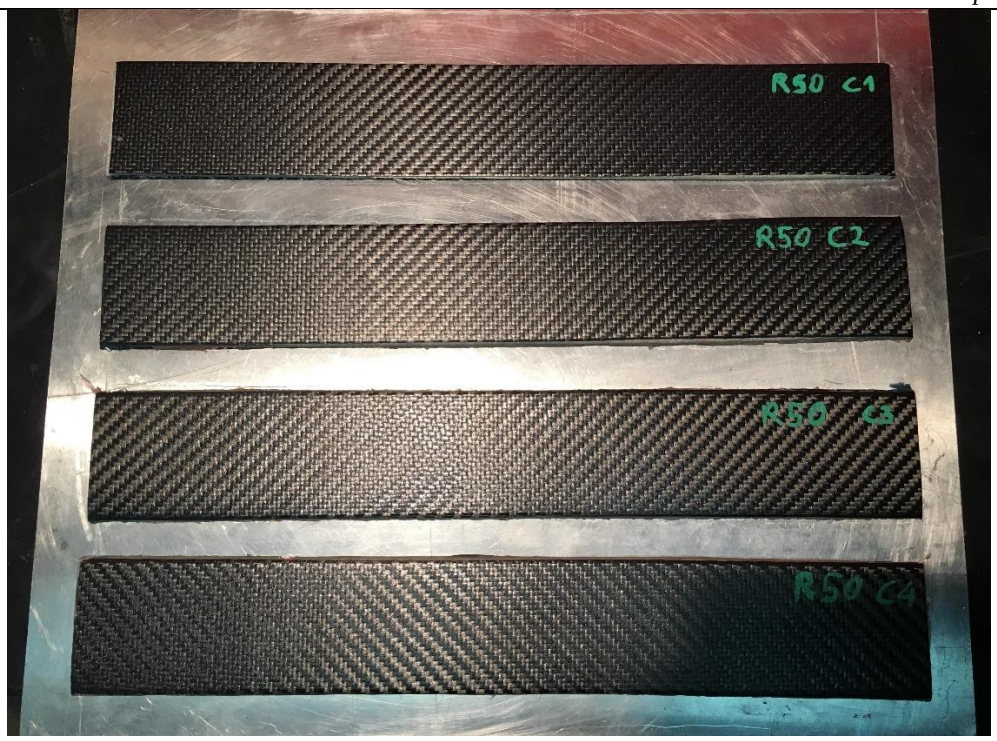
Proizvodnja kompozita izrađenih od prepreg materijala zahtjeva postupak pečenja na povišenoj temperaturi zbog umrežavanja polimerne matrice. Režim zagrijavanja i temperatura umrežavanja preprega svojstvo su njegove matrice tj. smole, a budući da ih na tržištu postoji veliki broj, važno je znati podatke o korištenom prepregu.

Jedan od režima pečenja koji je odobren od strane proizvođača za korišteni tip preprega dozvoljava zagrijavanje kompozita na temperaturu umrežavanja brzinom 2 °C/min do temperature od 120 °C te držanje na toj temperaturi 2 sata. Navedeni režim korišten je za pečenje uzoraka u ovom radu te je prikazan na slici 31. Važno je napomenuti kako uzorci tokom cijelog perioda pečenja moraju biti pod vakuumom, kako bi se slojevi što bolje konsolidirali i na taj način dobila najbolja moguća mehanička svojstva.



Slika 31. Režim pečenja uzoraka

Uzorci su nakon završenog pečenja pušteni da se ohlade na sobnu temperaturu te su onda označeni. Uzorci nakon pečenja prikazani su na slici 32. Zadnji korak pripreme uzoraka za ispitivanje savojnih svojstava je rezanje na mjeru. Gotovi uzorci nakon rezanja prikazani su na slici 33.



Slika 32. Uzorci nakon pečenja

Slika 33. Izrezani uzorci skupine Rohacell 51 IG-F

3.2.2 Izrada ispitnih ploča prema pravilniku Formule Student

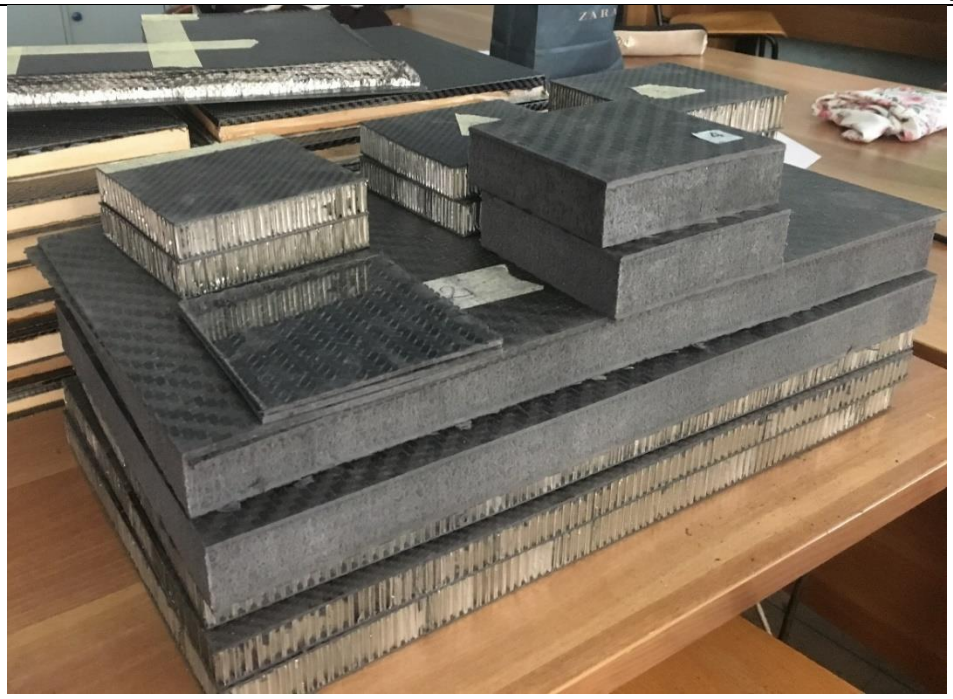
Ispitne ploče sendvič konstrukcija izrađene su u prostorijama tvrtke Rimac Automobili d.o.o. budući da posjeduju odgovarajuće strojeve i opremu za izradu ispitnih panela u većih dimenzija i većim količinama odjednom. Izrađene su 4 različite sendvič konstrukcije čiji su postavi

1. 20 mm aluminijsko saće CRIII – 1/8/5052/3.1N + $[45F_{3K}/0F_{3K}/45F_{3K}/0F_{3K}]_s$,
2. 20 mm aluminijsko saće CRIII – 1/8/5052/3.1N + $[45F_{3K}/0F_{12K}/45F_{12K}/0F_{3K}]_s$,
3. 25 mm aluminijsko saće CRIII – 1/8/5052/3.1N + $[0F_{12K}/+45_{UD}/-45_{UD}/0F_{3K}]_s$,
4. 30 mm Rohacell 51 IG-F + $[45F_{12K}/0F_{12K}/45F_{12K}/0F_{12K}/45F_{12K}/0F_{12K}]_s$.

Ispitne ploče izrađene su na isti način kao i prethodno opisani uzorci. Na slici 34 prikazane su ploče prije stavljanja u autoklav.

Slika 34. Ispitne ploče prije stavljanja u autoklav

Osim ispitnih ploča namijenjenih ispitivanju savijanjem izrađeni su istovremeno i uzorci za ispitivanje probijanjem te uzorci laminata za izradu kućišta baterijskog paketa. Svi navedeni uzorci prikazani su na slici 35.



Slika 35. Uzorci za ispitivanje prema zahtjevima FS pravilnika

3.2.3 Ispitivanje uzoraka

Dimenzije ispitnih uzoraka i način ispitivanja određen je prema normi DIN EN ISO 14125:2011-05 koja određuje širinu i dužinu uzoraka uzimajući u obzir vrste korištenog ojačanja u ljuskama kompozita i samu debljinu uzoraka. Ova norma je odgovarajuća za ispitivanje savojnih svojstava vlaknima ojačanih polimera [18].

Norma određuje

1. Princip ispitivanja – ispitivanja moraju biti provedena savijanjem u tri ili četiri točke.
2. Brzinu ispitivanja – preporučene vrijednosti iznose od 0,5 mm/min do 500 mm/min u koracima. Brzina ispitivanja trebala bi biti što bliža vrijednosti 0,4*h*, što u slučaju uzoraka izrađenih za potrebe ovog rada varira između 2,2 i 2,8 mm/min.
3. Minimalni broj istih uzoraka - 5 komada.
4. Radijus oslonaca i aplikatora sile – aplikator sile pri ispitivanju savijanjem u tri točke mora imati radijus 5 mm, dok oni namijenjeni ispitivanju savijanjem u 4 točke moraju imati promjer 3 mm. Radijus oslonaca za uzorke debljine $h \leq 3$ mm mora biti 2 mm, dok za one debljine $h > 3$ mm mora iznositi 5 mm.
5. Dimenzije ispitnih uzoraka te razmak između oslonaca – dimenzije uzoraka mogu biti određene fiksno za svaku kategoriju polimera ili se mogu odrediti kao funkcija njihove debljine. Ukoliko se određuje pomoću debljine uzoraka, kada se uzme u obzir odgovarajuća kategorija materijala i debljina uzoraka između 5 i 10 mm, dobiva se

omjer L/h koji iznosi 40 i omjer l/h koji iznosi 50. Veličina L predstavlja razmak između oslonaca, a veličina l predstavlja dužinu uzorka. Širina uzorka mora iznositi 15 mm u slučaju debljine $1 < h \leq 10$ mm.

6. Tip loma – međuslojno popuštanje kompozita nije prihvatljivo.

Budući da norma zahtijeva najmanje 5 istih uzoraka, zahtjevi norme nisu mogli biti u potpunosti ispunjeni. Osim toga, za razmak između oslonaca i dužinu uzoraka uzeti su fiksni iznosi bez obzira na debljinu cijelog sendviča, kako bi se pojednostavilo cijelo ispitivanje. On je iznosio 280 mm kako bi se zadovoljio omjer L/h za najdeblji uzorak. Omjer l/h nalaže dužinu najdebljeg uzorka od 350 mm, ali tu dužinu nije bilo moguće izraditi zbog ograničene količine početnog materijala. Debljina uzoraka varira između skupina od 5,40 do 7,09 mm ovisno o broju slojeva ojačanja u korama sendviča. Debljina jezgre u svim uzorcima je bila 5 mm. Dimenzije L x b svih uzoraka iznosila je 335 x 15 mm gdje veličina b predstavlja širinu uzorka. Brzina ispitivanja postavljena je na konstantnih 3 mm/min.

Savojna čvrstoća σ_f se prema normi računa prema izrazu

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}, \tag{3.6}$$

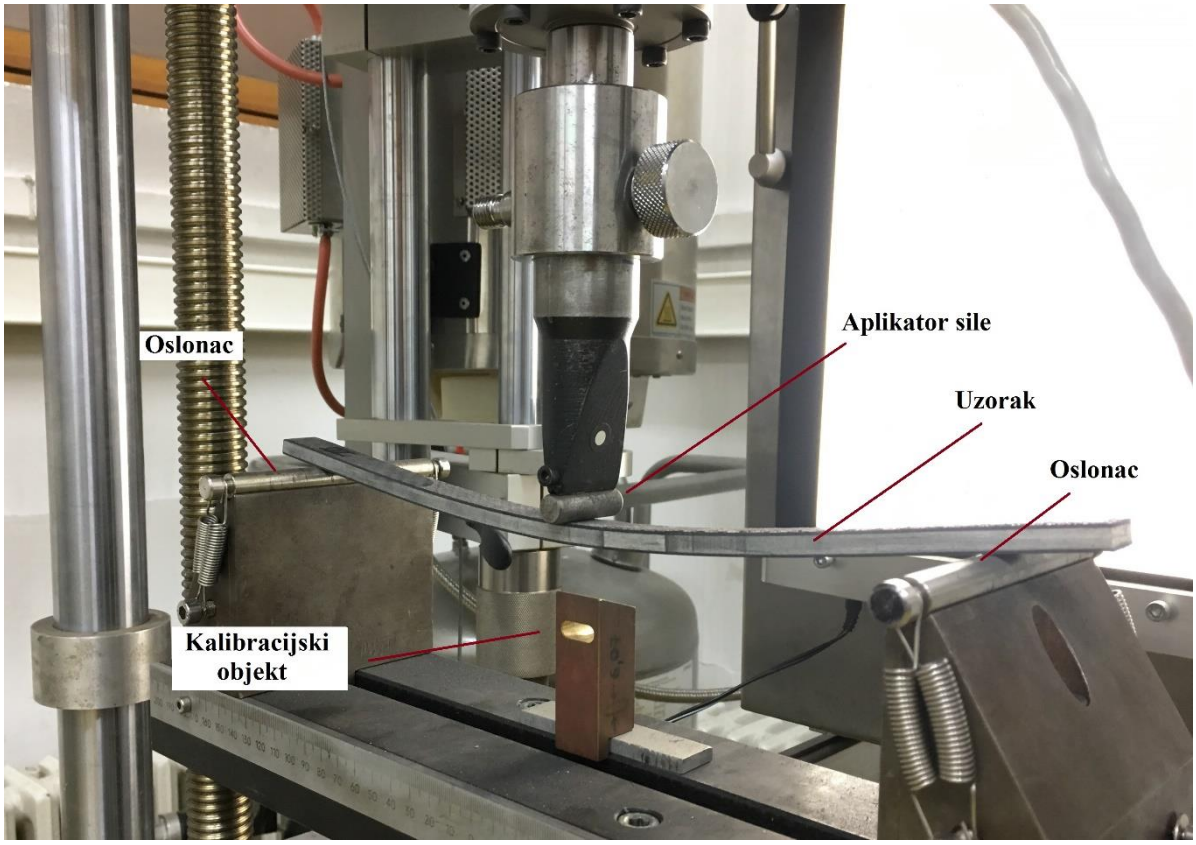
gdje veličina F predstavlja apliciranu silu pri savijanju uzorka, dok izraz za računanje savojnog modula elastičnosti E_f glasi

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3}\left(\frac{\Delta F}{\Delta s}\right), \tag{3.7}$$

gdje veličina s predstavlja progib uzorka pri savijanju. U daljnjem tekstu član ($\Delta F/\Delta s$) predstavljat će krutost pri savijanju S. Ispitivanje je provedeno na statičkoj hidrauličkoj kidalici Beta 50-5 (Messphysik, Austrija) koja je prikazana na slici 36.

Slika 36. Statička kidalica Messphysik Beta 50-5

Promjer oslonaca i aplikatora sile iznosi 10 mm, određen prema zahtjevima norme. Cijeli eksperimentalni postav prikazan je na slici 37.

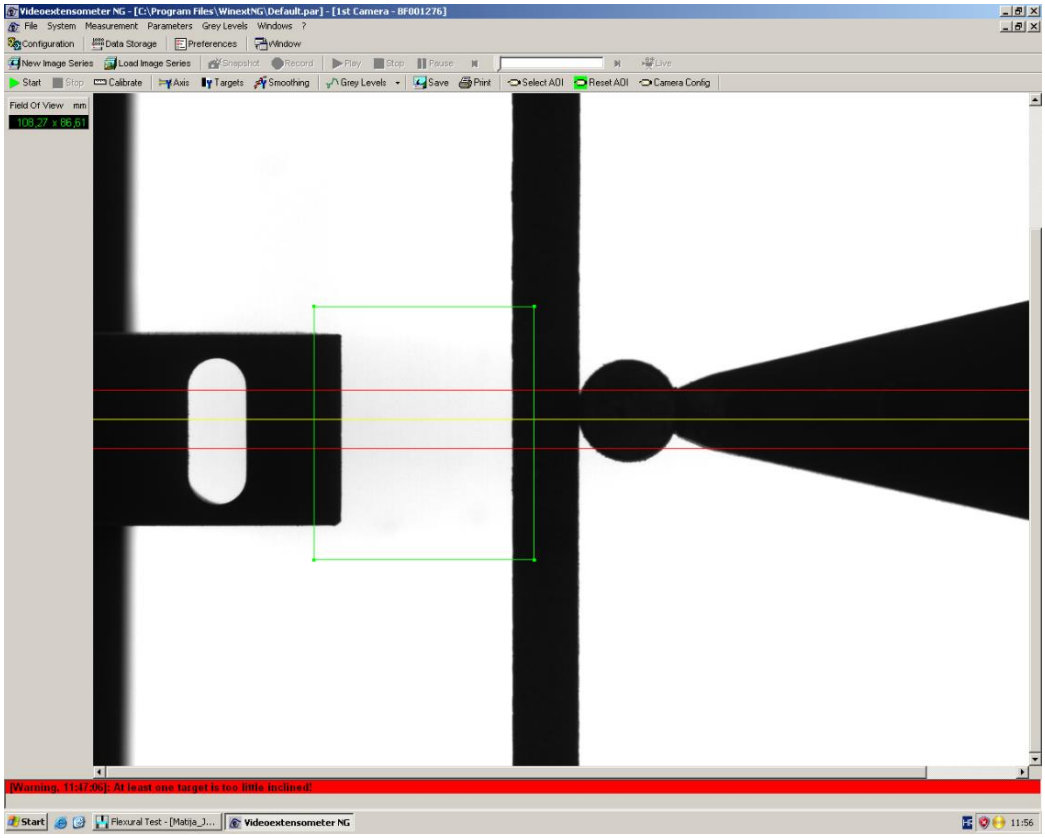


Slika 37. Eksperimentalni postav

Progib uzoraka mjeren je videokstenzometrom ME46-NG (Messphysik, Austrija). Kako su unutar pomaka dobivenog sa kidalice (vertikalni hod gornje čeljusti) sadržane neke nesavršenosti kao što su zračnosti na prihvatima kidalice, pomaci uslijed deformiranja samog okvira, potrebno je pomak tj. progib mjeriti izvana pomoću odgovarajućih uređaja za mjerenje pomaka. Jedan od takvih uređaja, koji je korišten prilikom ovog ispitivanja je videoekstenzometar. Videoekstenzometar je optički uređaj za mjerenje progiba koji pomoću kamere postavljene okomito na smjer progiba uzorka bezkontaktno mjeri njegov progib. Radi na način da tijekom opterećivanja snima niz slika određenom frekvencijom. Na tim slikama pomoću razvijenog algoritma pronalazi crne oštre rubove na bijeloj pozadini. Kako bi rubovi algoritmu bili što uočljiviji prilikom mjerenja, koristi se intenzivno i homogeno pozadinsko svjetlo, što je vidljivo na slici 38.

Algoritam unutar područja označenog zelenim pravokutnikom na slici 38 detektira donji rub uzorka i gornji rub referentnog objekta te na osnovu njihove međusobne udaljenosti određuje progib. Da bi sustav mogao što točnije mjeriti pomake slika mora biti što oštrija i kontrastna, pogotovo na promatranom odnosno donjem rubu uzorka.

Kalibracija je potrebna u svrhu dobivanja točnih podataka odnosno u ovom slučaju koliko piksela odgovara jednom milimetru. U vidno polje kamere postavlja se kalibracijski objekt točno definiranog oblika i dimenzija te se na taj način provodi kalibracija. Kalibracijski objekt korišten za ovo ispitivanje vidljiv je na slici 37.



Slika 38. Vidno polje kamere

Izlazne vrijednosti za progib dobivene ovim načinom mjerenja odnose se na razmak između donjeg ruba uzorka i gornjeg brida referentnog dijela. Računalo istovremeno u datoteku sprema podatke o vremenu, sili i progibu dobivenog videoekstenzometrom te automatski generira dijagrame sile u ovisnosti o progibu.

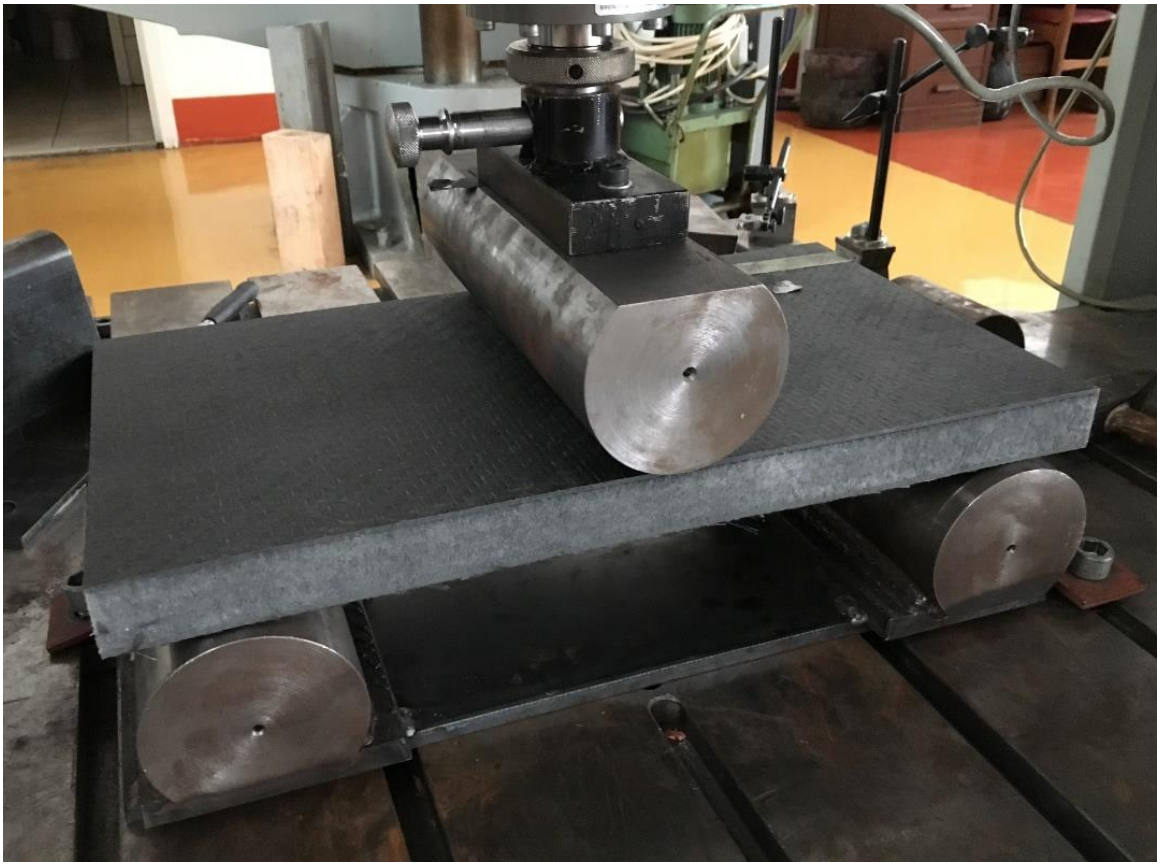
3.2.4 Ispitivanje testnih ploča prema pravilniku Formule Student

Kako bi se kompozitna sendvič konstrukcija mogla koristiti za izradu šasije bolida Formule Student, sama konstrukcija mora zadovoljiti nekoliko zahtjeva vezano uz mehanička svojstva. Zahtjevi su definirani pravilnikom kojeg svake godine izdaje organizacija FS Germany u kojem je navedeno da savojna krutost *EI* sendvič konstrukcije mora biti ekvivalentna savojnoj krutosti određenog broja čeličnih cijevi od kojih je inače sačinjena standardna čelična šasija. Broj čeličnih cijevi čija se savojna krutost uspoređuje s onom dobivenom ispitivanjem sendvič struktura varira ovisno o zoni bolida. Osim ovog zahtjeva, kompozitne strukture prilikom ispitivanja savojnih svojstava moraju imati veću ili jednaku savojnu čvrstoću i

sveukupni obavljeni rad prilikom ispitivanja od ispitanih čeličnih cijevi, a postoje i zahtjevi na minimalnu vršnu silu kod ispitivanja probijanjem sendvič kompozita.

Kako bi se rezultati ispitivanih uzoraka što lakše mogli ocijeniti, krovna organizacija natjecateljima daje digitalne radne tablice u koje se direktno unose rezultati ispitivanja. Te tablice imaju engl. naziv „Structural Equivalency Spreadsheet“ (u daljnjem tekstu „SES radne tablice“).

Dimenzije ispitnih panela određene su pravilnikom te iznose 500 x 275 mm. Razmak između oslonaca iznosi 400 mm, a promjeri oslonaca i aplikatora sile moraju iznositi minimalno 100 mm. Ispitni postav prikazan je na slici 39.



Slika 39. Postav za ispitivanje ploča prema FS pravilniku

4. REZULTATI

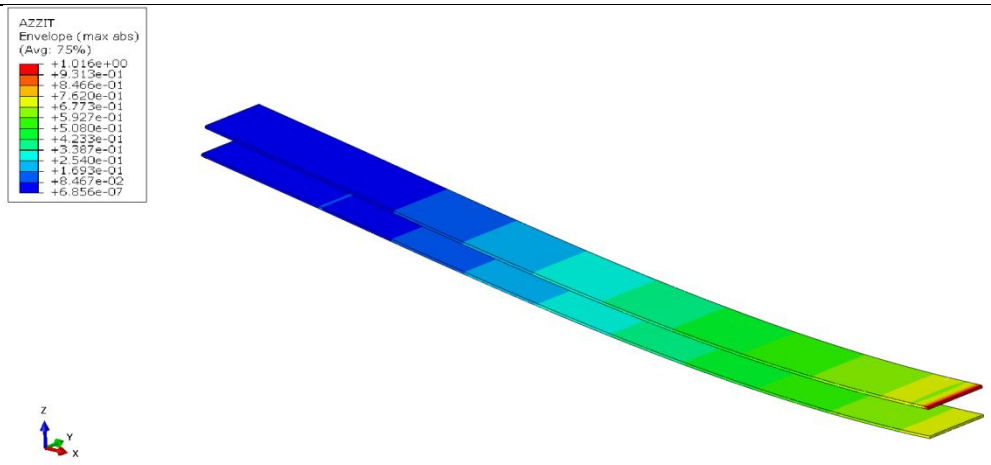
U ovom poglavlju su prikazani rezultati računalnih simulacija i eksperimentalnih ispitivanja savojnih svojstava uzoraka i ispitnih ploča.

4.1 Rezultati računalnih simulacija

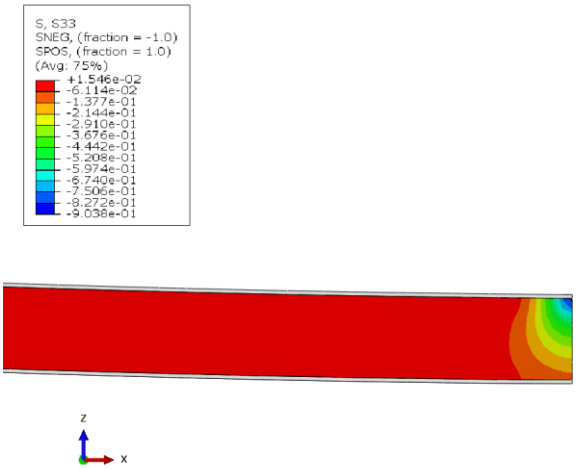
Računalne simulacije provedene su za svih 12 tipova uzoraka te sva 4 tipa ispitnih ploča. Prilikom analize rezultata čvrstoće uzoraka najveća pažnja posvećena je trima tipičnim načinima popuštanja sendvič konstrukcije

- popuštanje gornje ljuske zbog tlačnih naprezanja,
- utiskivanje jezgre,
- smično popuštanje jezgre.

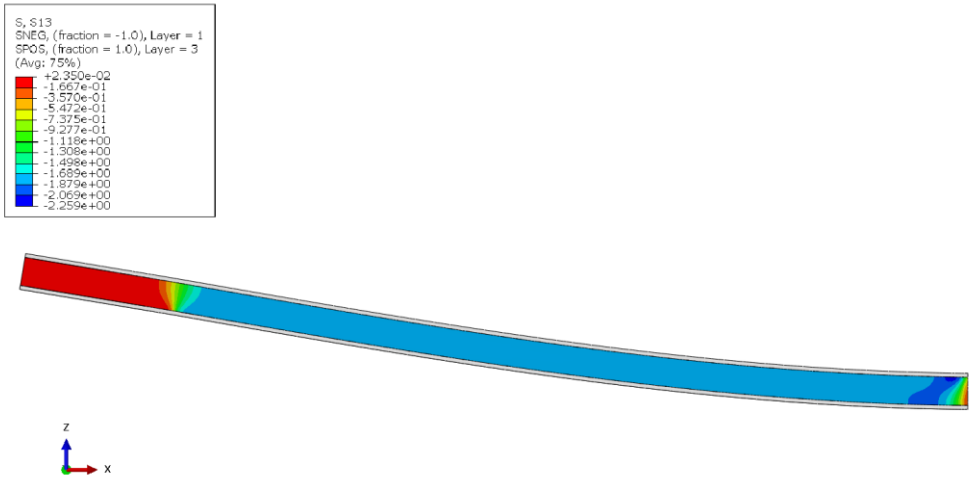
Promatrana izlazna varijabla kod analize čvrstoće ljuski bila je „AZZIT“ (Azzi-Tsai-Hill kriterij) iz razloga objašnjenog u poglavlju 3.1.2. Varijabla koja je promatrana za procjenu tlačne čvrstoće jezgre bila je normalna komponenta naprezanja „S33“, a varijabla korištena za procjenu smične čvrstoće jezgre bila je komponenta smičnog naprezanja „S13“. Iznosi tih dviju izlaznih varijabli uspoređeni su s iznosima dopuštenih naprezanja za navedene tipove naprezanja ($\sigma_{t\,dop}$ i τ_{dop}). Razlog zašto su se promatrale ove komponente naprezanja zasebno, a nije se koristila neka od postojećih teorija čvrstoće kao npr. Huber-Mises-Hencky je to što strukturalne pjene posjeduju nejednaka svojstva tlačne i vlačne čvrstoće. Tlačna čvrstoća jezgre 51 IG-F je više nego dvostruko manja od vlačne. Samim time ekvivalentno naprezanje u jezgri nema smisla uspoređivati s rezultatom vlačnog pokusa. Općenito gledano, nije dobra praksa razmatrati komponente naprezanja zasebno, budući da u konstrukciji može doći do loma i prije dostizanja dopuštenog naprezanja za pojedine komponente. Zato je važno naglasiti da su prethodno objašnjeni načini predviđanja popuštanja jezgre ovdje korišteni samo iz potrebe budući da von Misesova teorija nije bila iskoristiva. Na slikama 40 do 42 prikazani su prethodno spomenuti kriteriji po kojima će se procjenjivati popuštanje sendvič konstrukcije na određen način, zajedno s iznosima promatranih varijabli. Budući da bi u radu bilo previše slika da se za svaki uzorak prikazuju te slike, rezultati analize uzroka loma prikazani su u tablici 5 i 6, kao i rezultati izračunatog savojnog modula elastičnosti uzoraka E_f.



Slika 40. Kriterij popuštanja ljuski



Slika 41. Promatrana varijabla normalne komponente naprezanja S33



Slika 42. Promatrana varijabla smičnog naprezanja jezgre S13

Tablica 5. Rezultati računalnih simulacija normiranih uzoraka

	Savojni modul elastičnosti GPa	Uzrok popuštanja prema simulaciji	Sila pri popuštanju N
R51-C1	11,17	Utiskivanje jezgre	29,8
R51-C2	17,07	Utiskivanje jezgre	58,6
R51-C3	20,20	Utiskivanje jezgre	73,5
R51-C4	20,32	Utiskivanje jezgre	92,4
R110-C1	12,07	Utiskivanje jezgre	74,1
R110-C2	19,47	Utiskivanje jezgre	127,8
R110-C3	22,40	Utiskivanje jezgre	178,7
R110-C4	25,11	Utiskivanje jezgre	230,5
R200-C1	12,63	Popuštanje gornje kore	115,4
R200-C2	20,86	Popuštanje gornje kore	218,4
R200-C3	24,57	Popuštanje gornje kore	313,3
R200-C4	29,79	Popuštanje gornje kore	412,8

Tablica 6. Rezultati računalnih simulacija ispitnih ploča

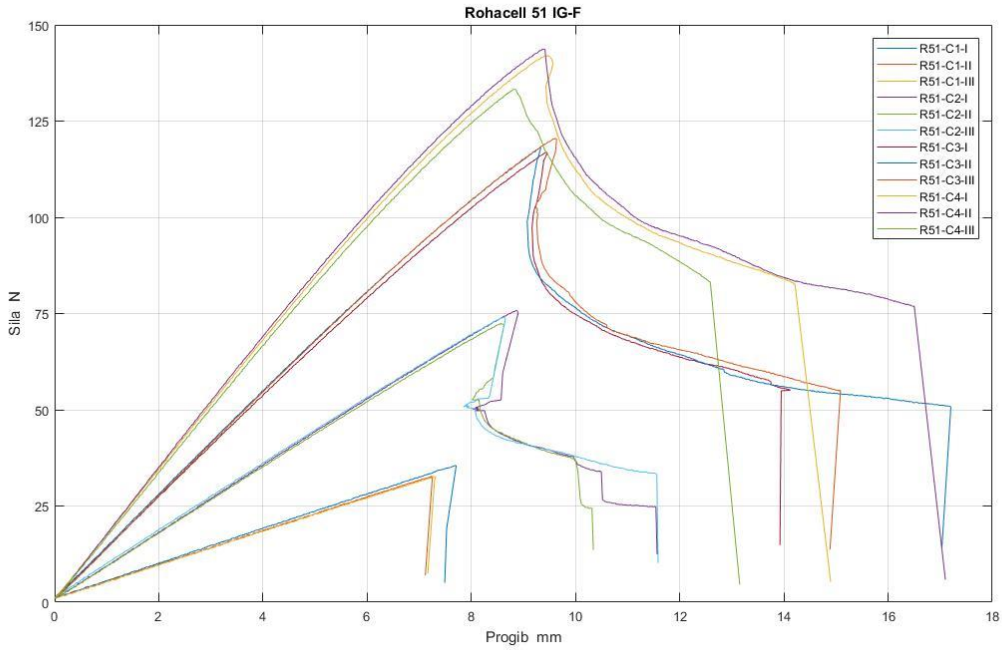
	Postav 1	Postav 2	Postav 3	Postav 4
Krutost pri savijanju *S* N/mm	1613,29	2143,78	2981,95	2069,63

Rezultati računalnih simulacija za ispitne postave ploča zapisani su kao savojna krutost *S*, a ne kao savojni modul elastičnosti budući da je ona glavni podatak za SES radne tablice. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti za ispitne ploče prikazane su u poglavlju 4.3.

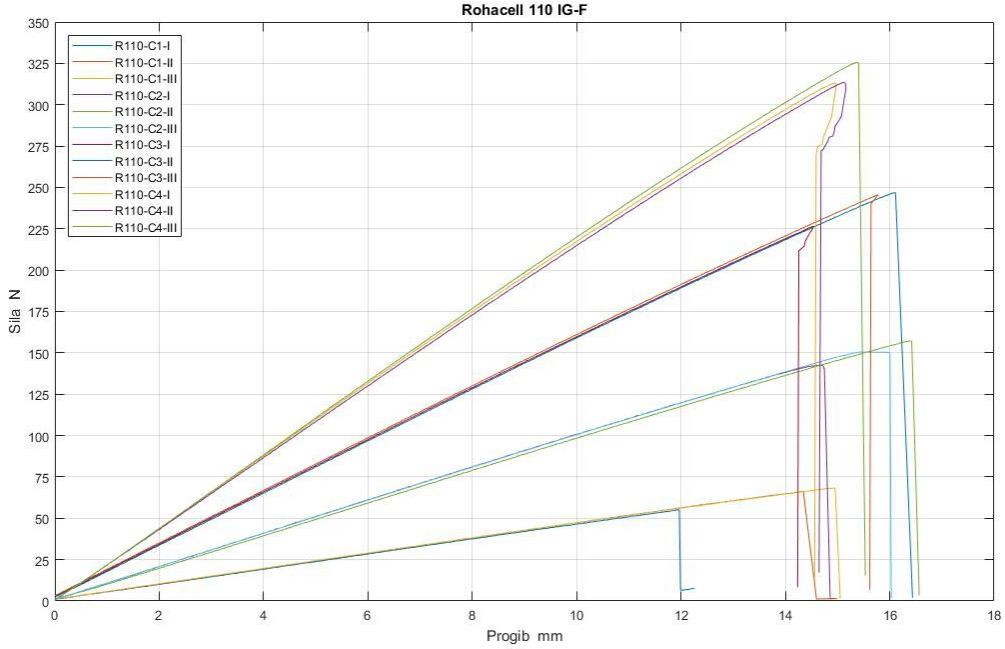
4.2 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja

4.2.1 Rezultati normiranih uzoraka

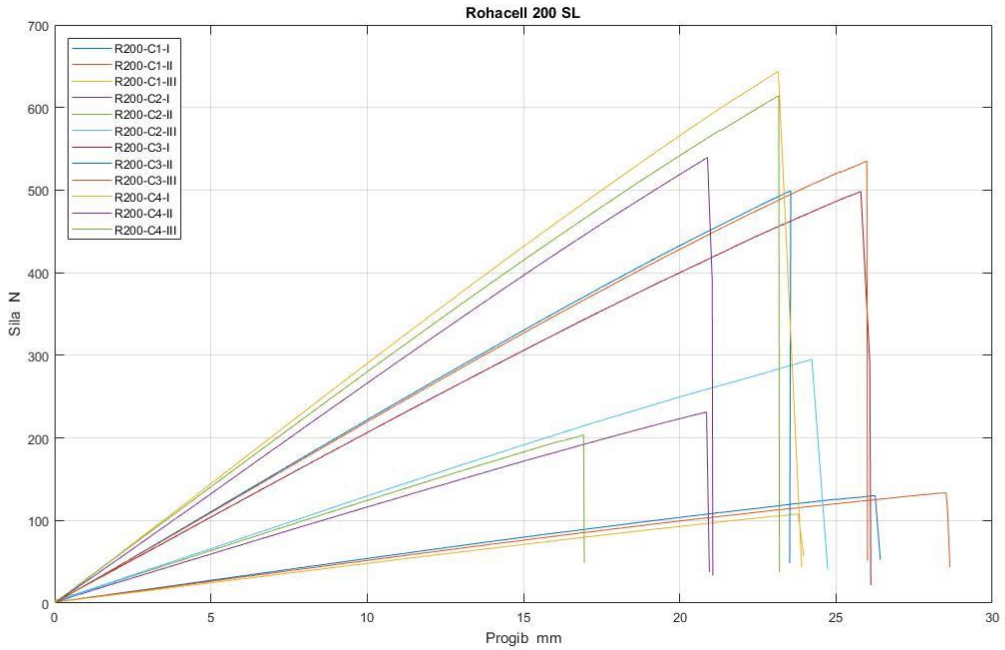
Nakon provedbe eksperimentalnih ispitivanja savojnih svojstava obrađeni su podaci mjerenja. Kako bi se vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula mogle izračunati, izmjerene su dimenzije uzoraka. Širina i debljina svakog uzorka mjerena je na tri mjesta na području koje dolazi između oslonaca prilikom savijanja u tri točke te je za računanje savojnih svojstava svakog pojedinog uzorka uzeta aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti. Na slikama 43 do 45 prikazani su dijagrami sile u ovisnosti o pomaku za tri različite skupine uzoraka.



Slika 43. Dijagram sila – pomak uzoraka jezgre 51 IG-F



Slika 44. Dijagram sila – pomak uzoraka jezgre 110 IG-F



Slika 45. Dijagrami sila – pomak uzoraka jezgre 200 SL

Uzorci su pokazali dobro međusobno poklapanje rezultata, a jedino značajnije rasipanje maksimalne sile vidljivo u skupini uzoraka R200, razredu C2. Uzorci skupine R51 uglavnom su pokazali značajke žilavog loma. Razred C1 imao je relativno rano popuštanje gornje ljuske, a posljedica je kombinacije niske krutosti ljuske i jezgre pri tlačnom opterećenju. Žilavo ponašanje pri lomu kod ostalih razreda ove skupine može se objasniti pojavom

utiskivanja gornje ljuske sendviča u jezgru i tek naknadnim popuštanjem gornje ljuske. To je bio slučaj kod uzoraka razreda C2 i C3 navedene skupine, kao što je prikazano na slici 46.

Slika 46. Utiskivanje jezgre kod uzoraka skupine R51 razreda C2 i C3

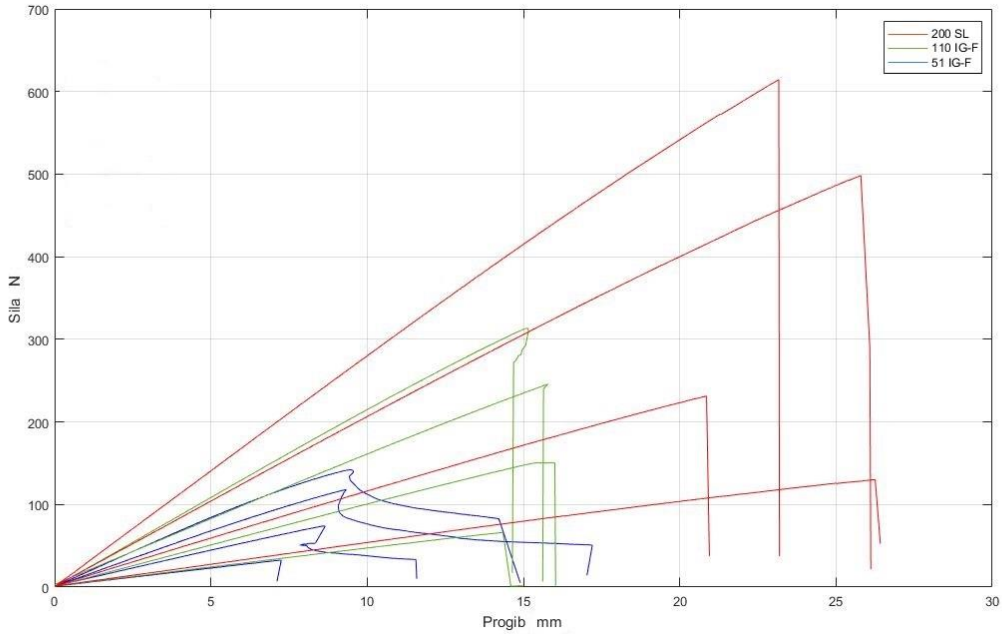
Kod razreda C4 došlo je do smičnog popuštanja jezgre i to u ovom slučaju dosta postupno. Lomu jezgre pri smičnom opterećenju prethodilo je i značajno plastično utiskivanje jezgre, kao što je vidljivo na slici 47 gdje je prikazan detalj desne polovice uzorka. Sredina uzorka vidljivo je utisnuta u širem području.

Slika 47. Uzorak R51-C4

Uzorci skupina R110 i R200 pokazali su značajke krhkog loma. Vjerojatni uzrok tome je dosezanje tlačne čvrstoće ugljikovih vlakana u gornjoj ljuski sendviča. Uzorak R200-C4 na slici 48 prikazuje stanje gornje ljuske nakon loma.

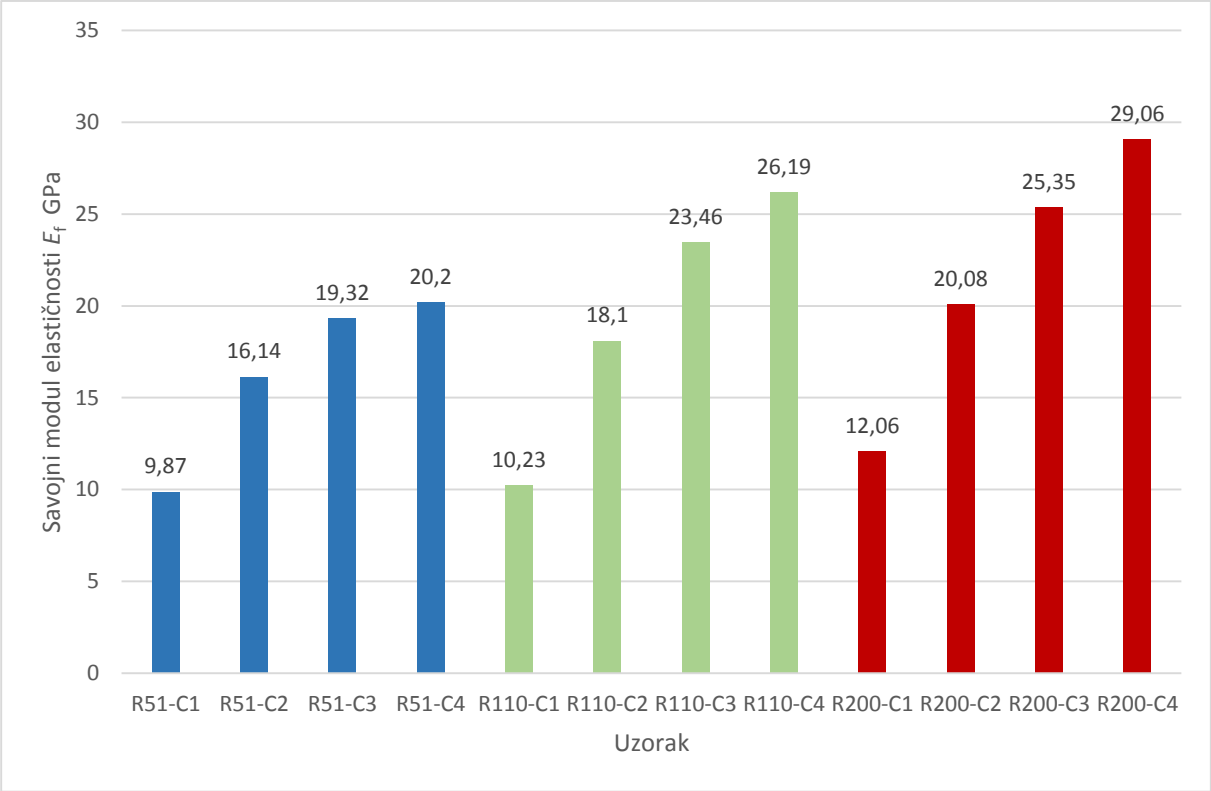
Slika 48. Popuštanje gornje ljuske sendviča uzorka R200-C4

Strukturalne pjene su materijali koji u odnosu na konstrukcijske čelike i uobičajeno korištene legure aluminija pokazuju relativno krhko ponašanje pri vlačnom ispitivanju, no njihova tlačna svojstva pokazuju izrazito plastično ponašanje koje je rezultat njihove ćelijaste mikrostrukture. Uzorci skupine R110 i R200 pokazuju dakle puno bolja mehanička svojstva za ovakav postav ispitivanja gdje aplikator sile ima relativno mali promjer i stvara veliko lokalno naprezanje. Dijagram s rezultatima uzoraka svih razreda prikazan je na slici 49. Od tri uzorka u svakom razredu prikazan je onaj sa srednjom vrijednosti čvrstoće kako bi dijagram bio pregledniji.

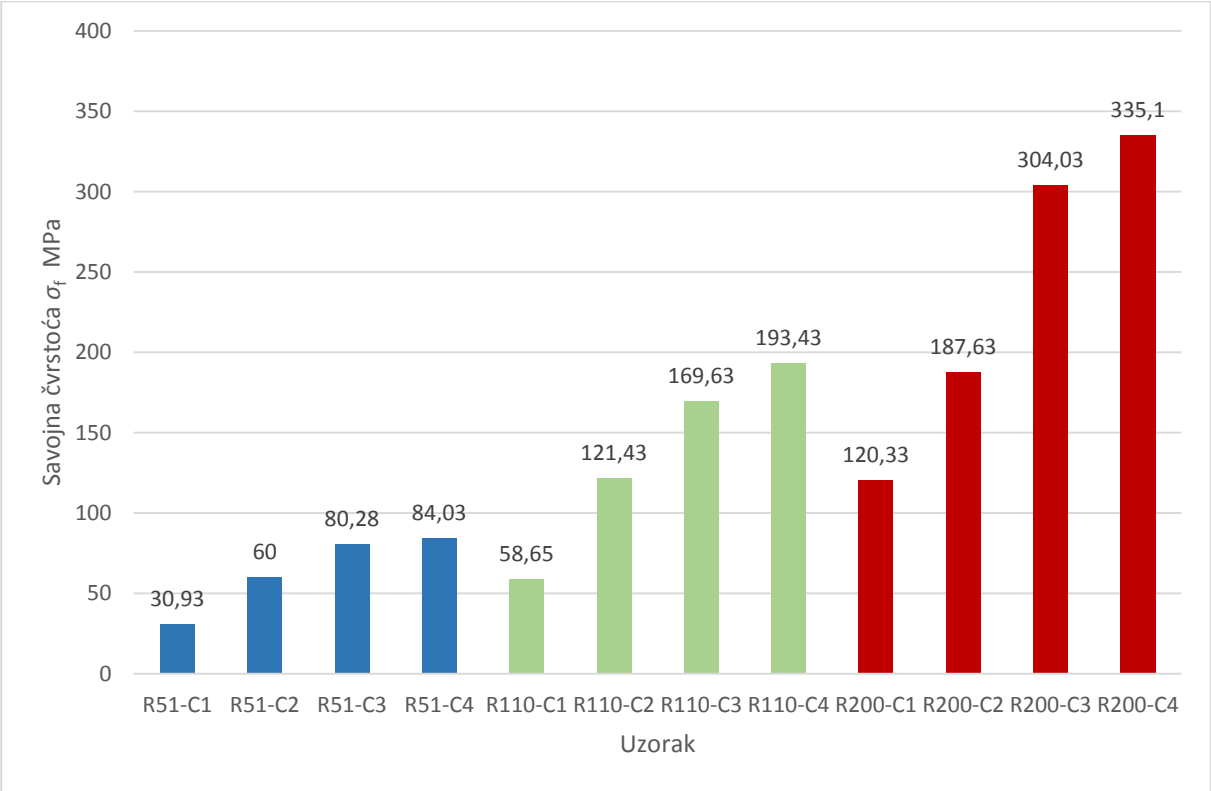


Slika 49. Dijagram sila – pomak za reprezentativne uzorke svih razreda

Rezultati savojnih svojstava uzoraka prikazani su na slici 50 i 51. Budući da su u svakom razredu ispitana 3 uzorka, izračunata je njihova aritmetička sredina.



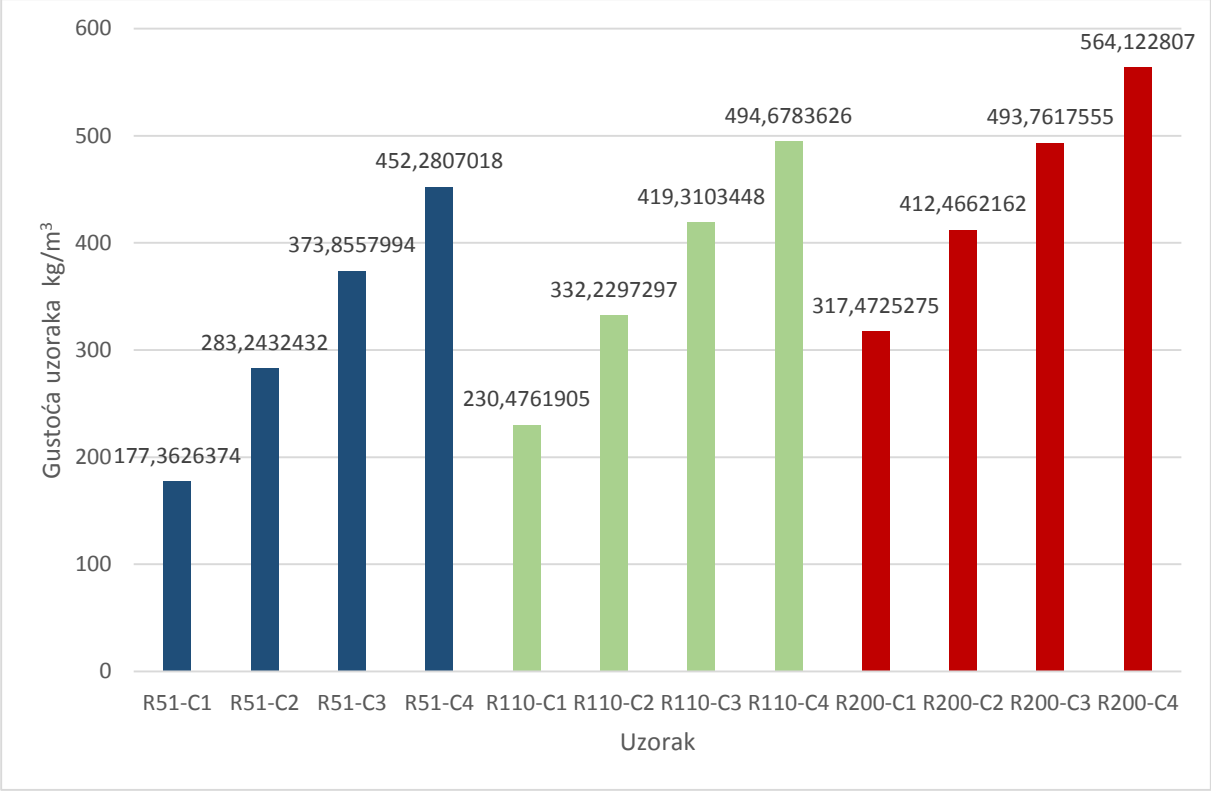
Slika 50. Savojni modul elastičnosti uzoraka



Slika 51. Savojna čvrstoća uzoraka

Savojna svojstva sendvič konstrukcija poboljšavaju se povećanjem broja slojeva ojačanja u ljuskama sendvič konstrukcije, kao što je očekivano. U prvoj skupini uzoraka pojavilo se izraženo zasićenje u porastu savojnog modula budući da materijal jezgre ima vrlo mali modul elastičnosti. Kod ostalih skupina je također vidljivo zasićenje, ali je značajno manje izraženo u odnosu na skupinu R51. Ista pojava je vidljiva i kod vrijednosti savojne čvrstoće, gdje je ograničavajući faktor čvrstoća jezgre.

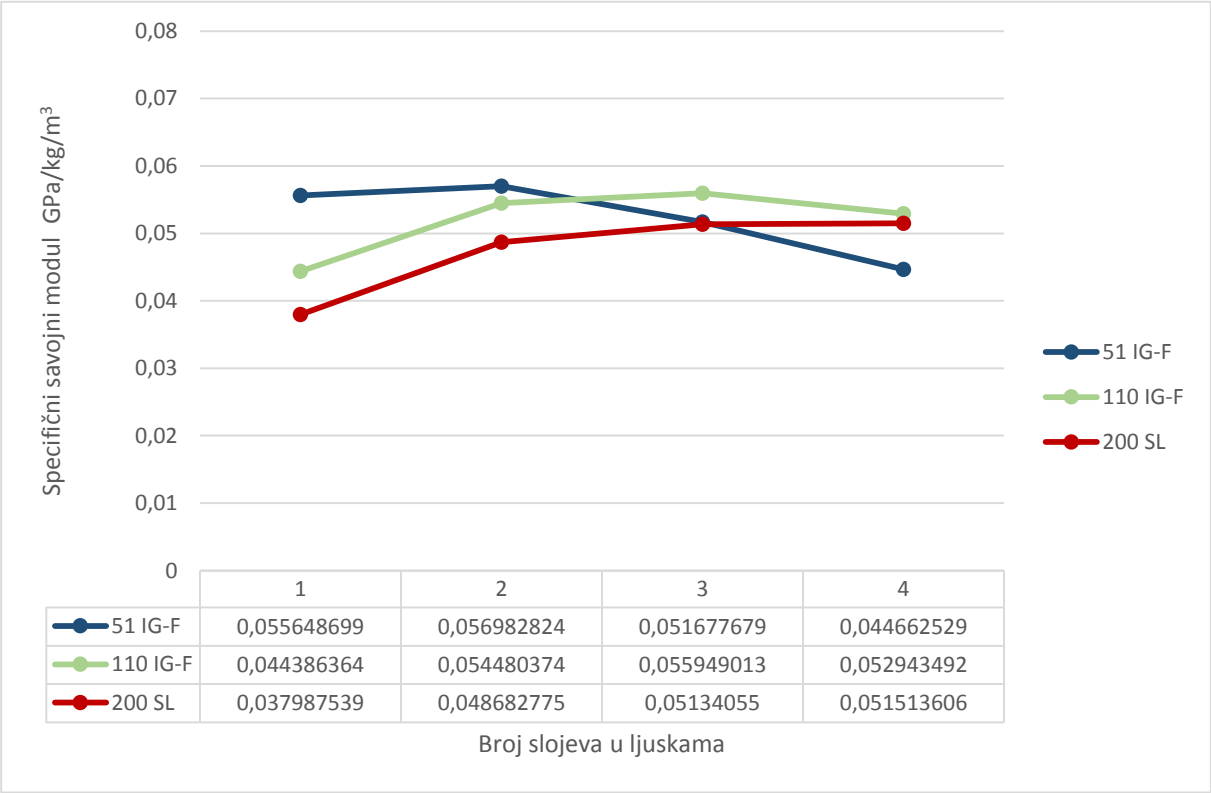
Dijagrami specifičnih svojstava pokazuju koliki utjecaj na performanse sendvič konstrukcije ima masa jezgre te koji su trendovi performansi u odnosu na broj slojeva ojačanja. Gustoće uzoraka prikazane su na slici 52. Masa jezgre u odnosu na masu cijelog sendviča važan je parametar kod izračuna specifičnih svojstava. Ona u ovom slučaju čini 24,18 % mase sendviča ukoliko se za gustoću jezgre uzme srednja vrijednost od 120,33 kg/m^3 te 2,5 sloja ojačanja efektivne gustoće 350 g/m^2. Taj postotak ovisi o konstrukciji tj. debljini jezgre.



Slika 52. Gustoće uzoraka

Na slici 53 prikazan je specifični modul elastičnosti uzoraka (u odnosu na njihovu gustoću). Najučinkovitiji postav po pitanju specifičnog savojnog modula elastičnosti za skupinu R51 dosegnut je već pri jednom sloju ojačanja u svakoj ljuski, dok je za druge dvije skupine jezgri najučinkovitiji postav s dva sloja ojačanja. Ukoliko se skupine R110 i R200 uspoređuju pri malom broju slojeva ojačanja, tj za konstrukcije sa slabim zahtjevom u odnosu na krutost *S*,

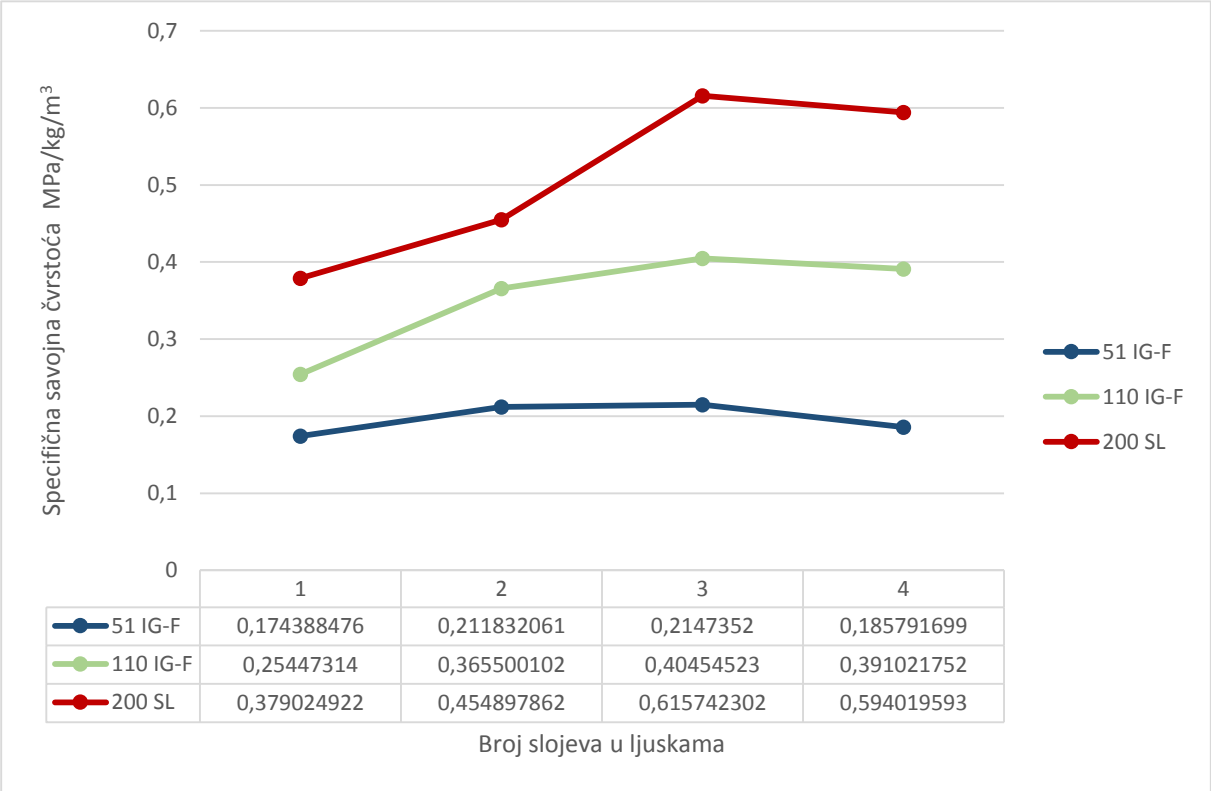
one ne opravdavaju svoju dodatnu masu. Uzorci skupina R110 i R200 su isplativiji samo u slučaju da tražena konstrukcija mora imati visoku krutost *S* tj. veći broj slojeva ojačanja u ljuskama. U tom slučaju zanimljivo je primjetiti da najučinkovitiji postav imaju uzorci skupine R110-C3 i R110-C4, a ne uzorci iz skupine R200.



	1	2	3	4
51 IG-F	0,055648699	0,056982824	0,051677679	0,044662529
110 IG-F	0,044386364	0,054480374	0,055949013	0,052943492
200 SL	0,037987539	0,048682775	0,05134055	0,051513606

Slika 53. Specifični savojni modul uzoraka

Na slici 54 prikazana je specifična čvrstoća prema skupinama uzoraka (u odnosu na njihovu gustoću). Dijagram specifične čvrstoće za razliku od prethodnog pokazuje vrlo podijeljene skupine uzoraka. Najučinkovitiji postav postiže se s 2 sloja ojačanja kod skupine R51, dok broj slojeva kod skupina R110 i R200 iznosi 3. Ovaj dijagram razlikuje se od prethodnog i po činjenici da pokazuje naklonjenost boljim odnosno gušćim jezgrama, što se objašnjava vrlo izraženim razlikama između iznosa savojne čvrstoće među skupinama.

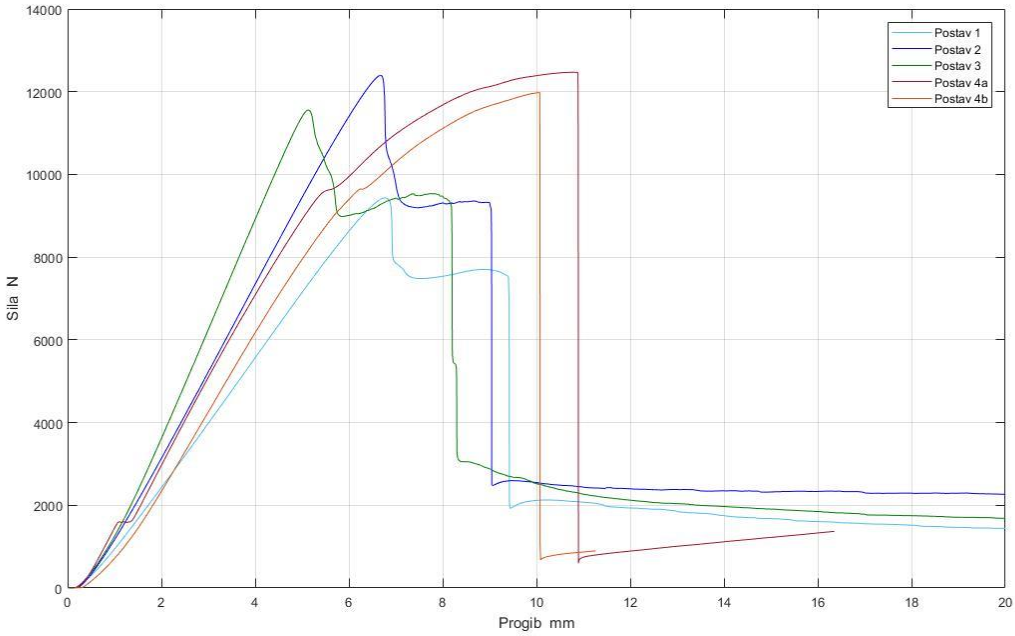


	1	2	3	4
51 IG-F	0,174388476	0,211832061	0,2147352	0,185791699
110 IG-F	0,25447314	0,365500102	0,40454523	0,391021752
200 SL	0,379024922	0,454897862	0,615742302	0,594019593

Slika 54. Specifična savojna čvrstoća uzoraka

4.2.2 Rezultati ispitnih ploča

Ispitivanje savijanjem u tri točke provedeno je na ispitnim pločama napravljenim u svrhu zadovoljavanja pravilnika za izradu kompozitne monokok šasije prema FS Germany pravilniku. U poglavlju su prikazani i izračuni prema SES radnoj tablici koja služi za provjeru kompozitnih struktura mogu li se koristiti za izradu određenih zona šasije. Na slici 55 prikazani su dijagrami sile u ovisnosti o pomaku za sva 4 tipa postava. Četvrti tip postava jedini je izrađen u dva primjerka te će njegove vrijednosti savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće biti računati kao aritmetička sredina dvaju podataka.



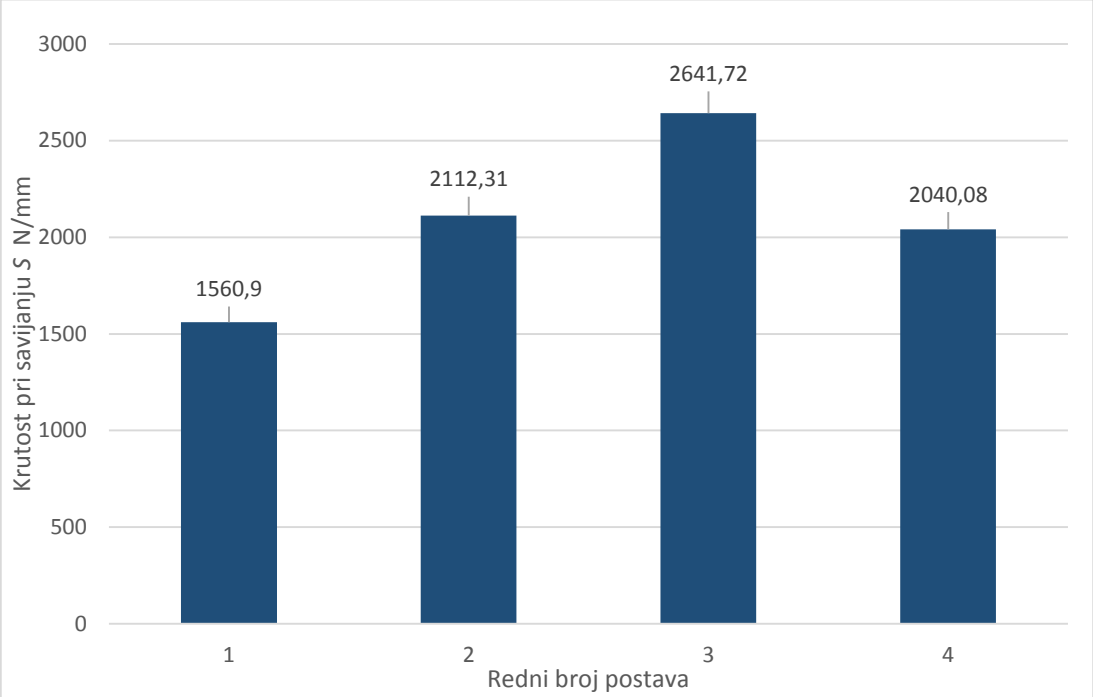
Slika 55. Rezultati ispitivanja ploča za dokazivanje ekvivalentnosti po FS pravilniku

Na slici 56 i 57 prikazane su ispitne ploče nakon provedenog ispitivanja. Na slikama je vidljivo utiskivanje jezgre (pojava stepenice u dijagramu sila-pomak) te nakon toga puknuće gornje ljuske (nagli pad sile u dijagramima). Ispitne ploče postava 4 s pjenastom jezgrom puknuli su oba puta na krhak način te je na uzorku vidljiva velika pukotina koja je propagirala kroz jezgru, što daje naslutiti da se radi o puknuću uzrokovanom smičnim naprezanjima.

Slika 56. Ispitne ploče postava 1 do 3 nakon provedenog ispitivanja

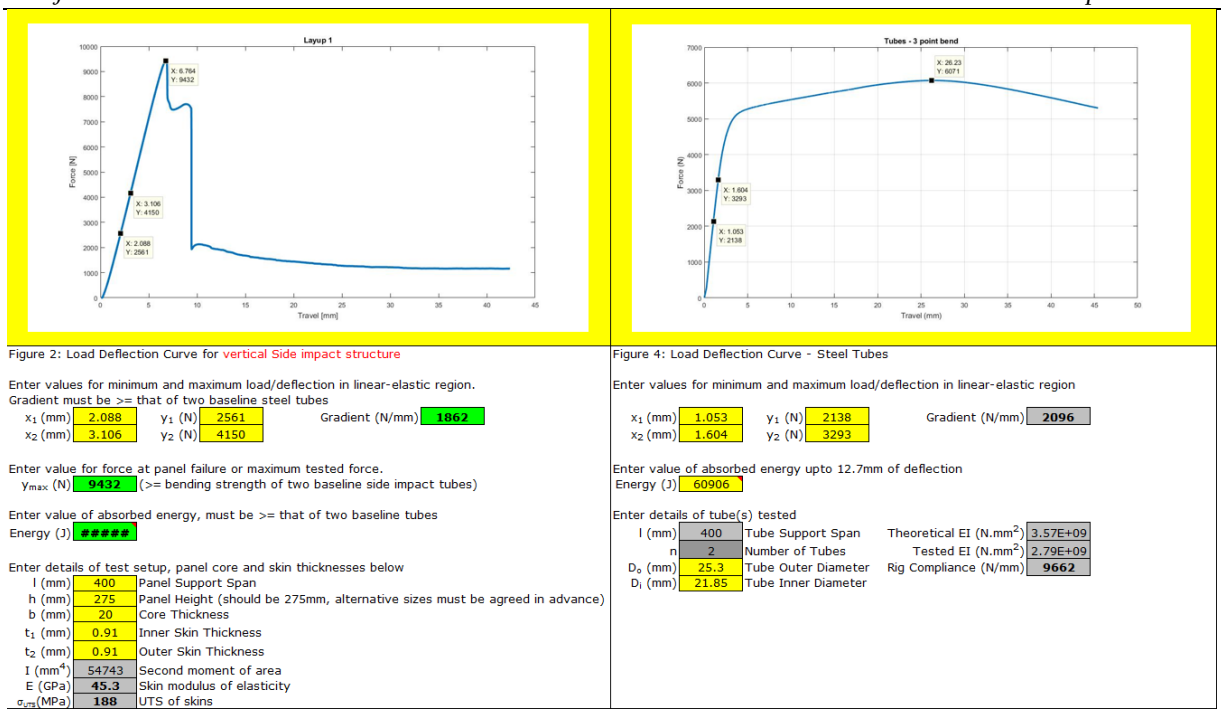
Slika 57. Ispitna ploča postava 4 nakon provedenog ispitivanja

Slikom 58 dani su rezultati ispitivanja testnih ploča. Budući da radna tablica zahtjeva podatke za izračun nagiba pravca linearnog dijela dijagrama sila-progib, odnosno njegovu krutost *S*, rezultati su prikazani u tom obliku.



Slika 58. Rezultati ispitivanja testnih ploča

Najbolji rezultat imala je ploča postava 3, što je očekivano budući da ima deblju jezgru od prva dva postava. Zadnji postav ima zapravo dosta nisku krutost s obzirom na debljinu jezgre i broj slojeva ojačanja u ljuskama. Ukoliko se ispuni dio SES radne tablice namijenjen računanju krutosti ispitanih ploča kao što je prikazano na slici 59, tada se u drugom dijelu radne tablice mogu dobiti informacije o tome zadovoljava li ploča zahtjeve određene zone šasije.



Slika 59. Primjer ispunjavanja podataka o savojnim svojstvima u SES radnoj tablici

Zona šasije s najvećim mehaničkim zahtjevima je bočna udarna zona pod engl. nazivom „Side impact structure“ te se iz tog razloga provjerava ekvivalentnost izrađenih ispitnih ploča za navedenu zonu. Ukoliko je ispitana sendvič konstrukcija ekvivalentna čeličnoj konstrukciji koja se koristi za izradu klasičnih šasija, tada ćelija s postotkom ekvivalentnosti krutosti (krajnja desna na slici 60) poprimi zelenu boju. Narančasta boja u radnoj tablici uobičajeno označava mogućnost dokazivanja ekvivalentnosti mjerenjem stvarnog momenta inercije presjeka monokoka na dijelu zone kojoj se dokazuje ekvivalentnost. Budući da je pravilima taj postupak zabranjen za bočnu udarnu zonu, on se tada računa kao da se radi o potpuno ravnoj ploči, a narančasta boja tada označava nedovoljnu krutost. Slike 60 do 63 pokazuju rezultate ekvivalentnosti svih ispitanih postava sendviča redom od prvog do četvrtog.

Side Impact Structure

Enter construction type: Composite only

Material Property	Baseline	Upper SIS Member	Your Tube type 2	Your Tube type 3	Your Tubes Total	Composite Side (Vertical)	Composite Floor (Horizontal)	Your Total	
Material type	Steel	Steel	Steel	Steel		Composite 1	Composite 1		
Tubing Type	Round	Round	Round	Round		NA	NA		
Material name /grade	Steel	Steel	Steel	Steel		T2.6_Laminate	T2.6_Laminate		
Youngs Modulus, E	2.00E+11	2.00E+11	2.00E+11	2.00E+11		4.53E+10	4.53E+10		
Yield strength, Pa	3.05E+08	3.05E+08	3.05E+08	3.05E+08		1.88E+08	1.88E+08		
UTS, Pa	3.65E+08	3.65E+08	3.65E+08	3.65E+08		1.88E+08	1.88E+08		
Yield strength, welded, Pa	1.80E+08	1.80E+08	1.80E+08	1.80E+08		N/A	N/A		
UTS welded, Pa	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08		N/A	N/A		
Straight or Bent / Multipiece Upper Member?	N/A	Straight	N/A	N/A					
Number of tubes	3	3	0	0					
Tube OD, mm	25.4	25.4	25.4	25.4					
Wall, mm	1.6	1.6	1.6	1.6					
		Baseline design?		NO					
Thickness of panel, mm						21.82	21.82		
Thickness of core, mm						20	20		
Thickness of inner skin, mm						0.91	0.91		
Thickness of outer skin, mm						0.91	0.91		
Panel height (Vertical Side)/width (Horiz. Floor),mm						320	239		
OD, m	0.0254	No tubes	No tubes	No tubes					
Wall, m	0.0016								
I, m^4	8.51E-09					6.37E-08	4.76E-08	1.11E-07	
EI	5.11E+03					2.89E+03	2.16E+03	5.05E+03	98.8 For Composites Only, Additional Proof Required
Area, mm^2	358.9					582.4	435.0	1.02E+03	NA
Yield tensile strength, N	1.09E+05					N/A	N/A	N/A	NA
UTS, N	1.31E+05					N/A	N/A	N/A	NA
Yield tensile strength, N as welded	6.46E+04					N/A	N/A	N/A	NA
UTS, N as welded	1.08E+05					N/A	N/A	N/A	NA
Max load at mid span to give UTS for 1m long tube, N	2.93E+03					N/A	N/A	N/A	NA
Max deflection at baseline load for 1m long tube, m	1.20E-02					N/A	N/A	N/A	NA
Energy absorbed up to UTS, J	1.76E+01					N/A	N/A	N/A	NA

Side	Outer	Inner	
b (m)	0.32	0.32	
h (m)	0.00091	0.00091	
A_1 (m^2)	2.91E-04	I_1 (m^4)	2.01E-11
A_2 (m^2)	2.91E-04	I_2 (m^4)	2.01E-11
y_1 (m)	0.000455	Ic_1 (m^4)	3.19E-08
y_2 (m)	0.021365	Ic_2 (m^4)	3.19E-08
Centroid (m)	0.0109	Ic_{12} (m^4)	6.37E-08
Floor	**Outer**	**Inner**	
b (m)	0.00091	0.00091	
h (m)	0.239	0.239	
A_1 (m^2)	2.17E-04	I_1 (m^4)	1.50E-11
A_2 (m^2)	2.17E-04	I_2 (m^4)	1.50E-11
z_1 (m)	0.000455	Ic_1 (m^4)	2.38E-08
z_2 (m)	0.021365	Ic_2 (m^4)	2.38E-08
Centroid (m)	0.0109	Ic_{12} (m^4)	4.76E-08

BACK to COVER SHEET

Slika 60. Ekvivalentnost ispitne ploče postava 1

Side Impact Structure

Enter construction type: Composite only

Material Property	Baseline	Upper SIS Member	Your Tube type 2	Your Tube type 3	Your Tubes Total	Composite Side (Vertical)	Composite Floor (Horizontal)	Your Total	
Material type	Steel	Steel	Steel	Steel		Composite 1	Composite 1		
Tubing Type	Round	Round	Round	Round		NA	NA		
Material name /grade	Steel	Steel	Steel	Steel		T2.6_Laminate	T2.6_Laminate		
Youngs Modulus, E	2.00E+11	2.00E+11	2.00E+11	2.00E+11		4.77E+10	4.77E+10		
Yield strength, Pa	3.05E+08	3.05E+08	3.05E+08	3.05E+08		1.84E+08	1.84E+08		
UTS, Pa	3.65E+08	3.65E+08	3.65E+08	3.65E+08		1.84E+08	1.84E+08		
Yield strength, welded, Pa	1.80E+08	1.80E+08	1.80E+08	1.80E+08		N/A	N/A		
UTS welded, Pa	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08		N/A	N/A		
Straight or Bent / Multipiece Upper Member?	N/A	Straight	N/A	N/A					
Number of tubes	3	3	0	0					
Tube OD, mm	25.4	25.4	25.4	25.4					
Wall, mm	1.6	1.6	1.6	1.6					
		Baseline design?		NO					
Thickness of panel, mm						22.44	22.44		
Thickness of core, mm						20	20		
Thickness of inner skin, mm						1.22	1.22		
Thickness of outer skin, mm						1.22	1.22		
Panel height (Vertical Side)/width (Horiz. Floor),mm						320	239		
OD, m	0.0254	No tubes	No tubes	No tubes					
Wall, m	0.0016								
I, m^4	8.51E-09					8.80E-08	6.57E-08	1.54E-07	
EI	5.11E+03					4.19E+03	3.13E+03	7.33E+03	143.5
Area, mm^2	358.9					780.8	583.2	1.36E+03	NA
Yield tensile strength, N	1.09E+05					N/A	N/A	N/A	NA
UTS, N	1.31E+05					N/A	N/A	N/A	NA
Yield tensile strength, N as welded	6.46E+04					N/A	N/A	N/A	NA
UTS, N as welded	1.08E+05					N/A	N/A	N/A	NA
Max load at mid span to give UTS for 1m long tube, N	2.93E+03					N/A	N/A	N/A	NA
Max deflection at baseline load for 1m long tube, m	1.20E-02					N/A	N/A	N/A	NA
Energy absorbed up to UTS, J	1.76E+01					N/A	N/A	N/A	NA

Side	Outer	Inner	
b (m)	0.32	0.32	
h (m)	0.00122	0.00122	
A_1 (m^2)	3.90E-04	I_1 (m^4)	4.84E-11
A_2 (m^2)	3.90E-04	I_2 (m^4)	4.84E-11
y_1 (m)	0.00061	Ic_1 (m^4)	4.40E-08
y_2 (m)	0.02183	Ic_2 (m^4)	4.40E-08
Centroid (m)	0.0112	Ic_{12} (m^4)	8.80E-08
Floor	**Outer**	**Inner**	
b (m)	0.00122	0.00122	
h (m)	0.239	0.239	
A_1 (m^2)	2.92E-04	I_1 (m^4)	3.62E-11
A_2 (m^2)	2.92E-04	I_2 (m^4)	3.62E-11
z_1 (m)	0.00061	Ic_1 (m^4)	3.29E-08
z_2 (m)	0.02183	Ic_2 (m^4)	3.29E-08
Centroid (m)	0.0112	Ic_{12} (m^4)	6.57E-08

BACK to COVER SHEET

Slika 61. Ekvivalentnost ispitne ploče postava 2

Side Impact Structure

Enter construction type: Composite only

Material Property	Baseline	Upper SIS Member	Your Tube type 2	Your Tube type 3	Your Tubes Total	Composite Side (Vertical)	Composite Floor (Horizontal)	Your Total	
Material type	Steel	Steel	Steel	Steel		Composite 1	Composite 1		
Tubing Type	Round	Round	Round	Round		NA	NA		
Material name /grade	Steel	Steel	Steel	Steel		T2.6_Laminate	T2.6_Laminate		
Youngs Modulus, E	2.00E+11	2.00E+11	2.00E+11	2.00E+11		4.69E+10	4.69E+10		
Yield strength, Pa	3.05E+08	3.05E+08	3.05E+08	3.05E+08		1.49E+08	1.49E+08		
UTS, Pa	3.65E+08	3.65E+08	3.65E+08	3.65E+08		1.49E+08	1.49E+08		
Yield strength, welded, Pa	1.80E+08	1.80E+08	1.80E+08	1.80E+08		N/A	N/A		
UTS welded, Pa	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08		N/A	N/A		
Straight or Bent / Multipiece Upper Member?	N/A	Straight	N/A	N/A					
Number of tubes	3	3	0	0					
Tube OD, mm	25.4	25.4	25.4	25.4					
Wall, mm	1.6	1.6	1.6	1.6					
		Baseline design?		NO					
Thickness of panel, mm						26.7	26.7		
Thickness of core, mm						24.4	24.4		
Thickness of inner skin, mm						1.15	1.15		
Thickness of outer skin, mm						1.15	1.15		
Panel height (Vertical Side)/width (Horiz. Floor),mm						320	239		
OD, m	0.0254	No tubes	No tubes	No tubes					
Wall, m	0.0016								
I, m^4	8.51E-09					1.20E-07	8.98E-08	2.10E-07	
EI	5.11E+03					5.64E+03	4.21E+03	9.85E+03	193.0
Area, mm^2	358.9					736.0	549.7	1.29E+03	NA
Yield tensile strength, N	1.09E+05					N/A	N/A	N/A	NA
UTS, N	1.31E+05					N/A	N/A	N/A	NA
Yield tensile strength, N as welded	6.46E+04					N/A	N/A	N/A	NA
UTS, N as welded	1.08E+05					N/A	N/A	N/A	NA
Max load at mid span to give UTS for 1m long tube, N	2.93E+03					N/A	N/A	N/A	NA
Max deflection at baseline load for 1m long tube, m	1.20E-02					N/A	N/A	N/A	NA
Energy absorbed up to UTS, J	1.76E+01					N/A	N/A	N/A	NA

Side	Outer	Inner	
b (m)	0.32	0.32	
h (m)	0.00115	0.00115	
A_1 (m^2)	3.68E-04	I_1 (m^4)	4.06E-11
A_2 (m^2)	3.68E-04	I_2 (m^4)	4.06E-11
y_1 (m)	0.000575	Ic_1 (m^4)	6.01E-08
y_2 (m)	0.026125	Ic_2 (m^4)	6.01E-08
Centroid (m)	0.0134	Ic_{12} (m^4)	1.20E-07

Floor	Outer	Inner	
b (m)	0.00115	0.00115	
h (m)	0.239	0.239	
A_1 (m^2)	2.75E-04	I_1 (m^4)	3.03E-11
A_2 (m^2)	2.75E-04	I_2 (m^4)	3.03E-11
z_1 (m)	0.000575	Ic_1 (m^4)	4.49E-08
z_2 (m)	0.026125	Ic_2 (m^4)	4.49E-08
Centroid (m)	0.0134	Ic_{12} (m^4)	8.98E-08

BACK to COVER SHEET

Slika 62. Ekvivalentnost ispitne ploče postava 3

Side Impact Structure

Enter construction type: Composite only

Material Property	Baseline	Upper SIS Member	Your Tube type 2	Your Tube type 3	Your Tubes Total	Composite Side (Vertical)	Composite Floor (Horizontal)	Your Total	
Material type	Steel	Steel	Steel	Steel		Composite 1	Composite 1		
Tubing Type	Round	Round	Round	Round		NA	NA		
Material name /grade	Steel	Steel	Steel	Steel		T2.6_Laminate	T2.6_Laminate		
Youngs Modulus, E	2.00E+11	2.00E+11	2.00E+11	2.00E+11		9.11E+09	9.11E+09		
Yield strength, Pa	3.05E+08	3.05E+08	3.05E+08	3.05E+08		6.01E+07	6.01E+07		
UTS, Pa	3.65E+08	3.65E+08	3.65E+08	3.65E+08		6.01E+07	6.01E+07		
Yield strength, welded, Pa	1.80E+08	1.80E+08	1.80E+08	1.80E+08		N/A	N/A		
UTS welded, Pa	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08		N/A	N/A		
Straight or Bent / Multipiece Upper Member?	N/A	Straight	N/A	N/A					
Number of tubes	3	3	0	0					
Tube OD, mm	25.4	25.4	25.4	25.4					
Wall, mm	1.6	1.6	1.6	1.6					
		Baseline design?		NO					
Thickness of panel, mm						34.8	34.8		
Thickness of core, mm						30	30		
Thickness of inner skin, mm						2.4	2.4		
Thickness of outer skin, mm						2.4	2.4		
Panel height (Vertical Side)/width (Horiz. Floor),mm						320	239		
OD, m	0.0254	No tubes	No tubes	No tubes					
Wall, m	0.0016								
I, m^4	8.51E-09					4.04E-07	3.02E-07	7.05E-07	
EI	5.11E+03					3.68E+03	2.75E+03	6.43E+03	125.9
Area, mm^2	358.9					1536.0	1147.2	2.68E+03	NA
Yield tensile strength, N	1.09E+05					N/A	N/A	N/A	NA
UTS, N	1.31E+05					N/A	N/A	N/A	NA
Yield tensile strength, N as welded	6.46E+04					N/A	N/A	N/A	NA
UTS, N as welded	1.08E+05					N/A	N/A	N/A	NA
Max load at mid span to give UTS for 1m long tube, N	2.93E+03					N/A	N/A	N/A	NA
Max deflection at baseline load for 1m long tube, m	1.20E-02					N/A	N/A	N/A	NA
Energy absorbed up to UTS, J	1.76E+01					N/A	N/A	N/A	NA

Side	Outer	Inner	
b (m)	0.32	0.32	
h (m)	0.0024	0.0024	
A_1 (m^2)	7.68E-04	I_1 (m^4)	3.69E-10
A_2 (m^2)	7.68E-04	I_2 (m^4)	3.69E-10
y_1 (m)	0.0012	Ic_1 (m^4)	2.02E-07
y_2 (m)	0.0336	Ic_2 (m^4)	2.02E-07
Centroid (m)	0.0174	Ic_{12} (m^4)	4.04E-07

Floor	Outer	Inner	
b (m)	0.0024	0.0024	
h (m)	0.239	0.239	
A_1 (m^2)	5.74E-04	I_1 (m^4)	2.75E-10
A_2 (m^2)	5.74E-04	I_2 (m^4)	2.75E-10
z_1 (m)	0.0012	Ic_1 (m^4)	1.51E-07
z_2 (m)	0.0336	Ic_2 (m^4)	1.51E-07
Centroid (m)	0.0174	Ic_{12} (m^4)	3.02E-07

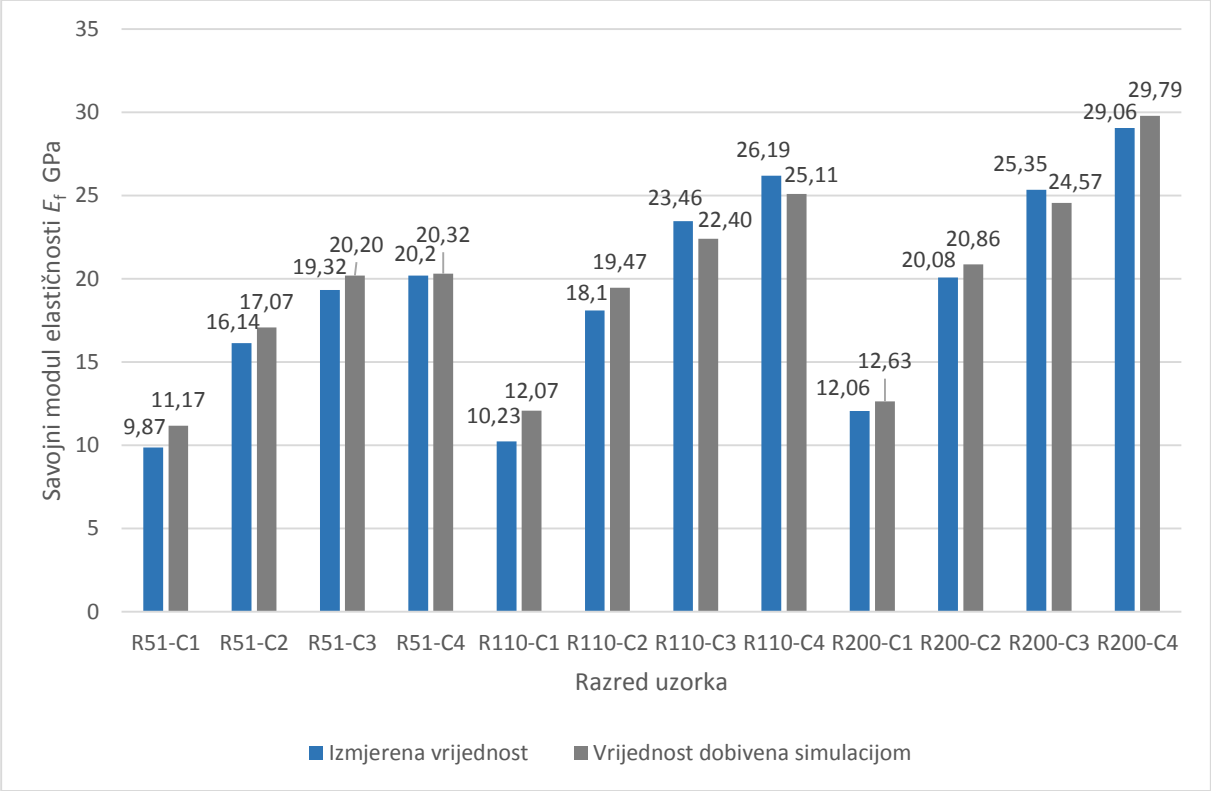
BACK to COVER SHEET

Slika 63. Ekvivalentnost ispitne ploče postava 4

Na prethodnim slikama vidljivo je da su svi postavi osim prvog zadovoljili uvjete postavljene u radnoj tablici. Budući da prvi i četvrti postav svejedno nisu bili planirani za korištenje na bočnoj udarnoj zoni, rezultat je zadovoljavajuć.

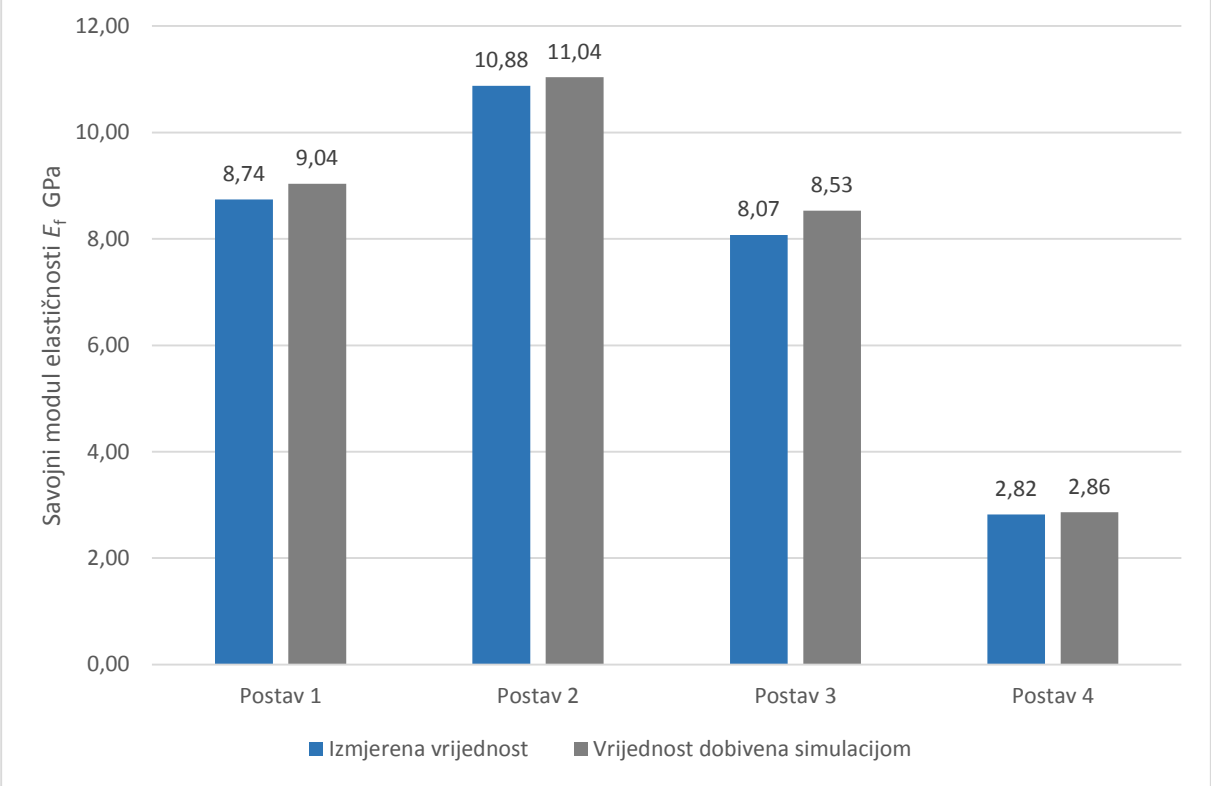
4.3 Usporedba rezultata računalnih simulacija s eksperimentalnim rezultatima

U ovom poglavlju dana je usporedba vrijednosti izmjerenog savojnog modula elastičnosti s rezultatima računalnih simulacija normiranih uzoraka i ispitnih ploča. Rezultati analize kriterija popuštanja ljuski i jezgre također su uspoređeni sa stvarnim uzrocima loma. Slika 64 prikazuje usporedbu savojnog modula elastičnosti uzoraka. Savojni modul elastičnosti dobiven analizom rezultata računalnih simulacija uzoraka pokazao je dobru korelaciju s izmjerenim vrijednostima. Aritmetička sredina svih odstupanja iznosi 4,09 %.



Slika 64. Usporedba savojnog modula elastičnosti uzoraka s rezultatima simulacije

Rezultati računalnih simulacija ispitnih ploča za zadovoljavanje pravilnika također su pokazali dobru korelaciju s izmjerenim vrijednostima, što je prikazano na slici 65. Aritmetička sredina svih odstupanja iznosi 3,01 %.



Slika 65. Usporedba savojnog modula elastičnosti ispitnih ploča s rezultatima simulacije

U tablici 7 analizirani su uzroci loma svih eksperimentalno ispitanih uzoraka, te je za svaki od njih određen glavni uzrok popuštanja dobiven računalnom simulacijom, prema kriterijima opisanim u poglavlju 4.1. Uz procjenu uzroka nastanka loma navedena je i sila pri kojoj dolazi do prekoračenja kriterija čvrstoće.

Tablica 7. Usporedba eksperimentalnih podataka i simulacija čvrstoće ispitnih uzoraka

	Uzrok loma	Sila pri lomu	Prvi uzrok popuštanja sendviča prema simulaciji	Sila pri popuštanju (simulacija)
R51-C1	Popuštanje gornje kore uslijed utiskivanja jezgre	33,6	Utiskivanje jezgre	29,8
R51-C2	Popuštanje gornje kore uslijed utiskivanja jezgre	74,04	Utiskivanje jezgre	58,6
R51-C3	Popuštanje gornje kore uslijed utiskivanja jezgre	118,47	Utiskivanje jezgre	73,5
R51-C4	Utiskivanje i smik jezgre	139,63	Utiskivanje jezgre	92,4
R110-C1	Popuštanje gornje kore	63,19	Utiskivanje jezgre	74,1
R110-C2	Popuštanje gornje kore	150,03	Utiskivanje jezgre	127,8
R110-C3	Popuštanje gornje kore	239,77	Utiskivanje jezgre	178,7
R110-C4	Popuštanje gornje kore	317,37	Utiskivanje jezgre	230,5
R200-C1	Popuštanje gornje kore	123,8	Popuštanje gornje kore	115,4
R200-C2	Popuštanje gornje kore	243,27	Popuštanje gornje kore	218,4
R200-C3	Popuštanje gornje kore	510,8	Popuštanje gornje kore	313,3
R200-C4	Popuštanje gornje kore	599,17	Popuštanje gornje kore	412,79

Jedan od ciljeva računalnih simulacija je objašnjenje uzroka nastalih lomova, a model se u tom pogledu pokazao korisnim jer je potvrđeno da se u simulaciji utiskivanje jezgre događa u velikom broju slučajeva pri sili manjoj od maksimalne vrijednosti kod eksperimenta. Model ne opisuje dobro smično popuštanje jezgre budući da se ono uvijek događa nakon određene plastične deformacije jezgre (u ovom slučaju utiskivanja), a plastična svojstva materijala nisu bila zadana. Model je dobro pokazao da je kod uzoraka skupine R200 najkritičniji faktor čvrstoće kompozita njegova gornja ljuska, iako bi točnost maksimalne sile mogla biti bolja.

5. ZAKLJUČAK

Savojna svojstva sendvič konstrukcija rezultat su mehaničkih svojstava njene jezgre i ljuski. Cilj rada bio je raščlaniti te utjecajne faktore i pokazati njihov pojedinačni utjecaj na svojstva pri savijanju. Korištenjem različitih gustoća strukturalne pjene trgovačkog naziva Rohacell te variranjem broja slojeva ojačanja u ljuskama sendviča dobiven je širok raspon iznosa savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće. Sendvič konstrukcije su izrađene laminiranjem prepreg materijala poštivajući pravila izrade kako bi se dobila najbolja mehanička svojstva. Korišteni materijali jezgre odabrani su na temelju njihovih različitih mehaničkih svojstava, koja u ovom slučaju ovise o njihovoj gustoći. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava sendvič struktura ukazali su na relativno mali utjecaj mehaničkih svojstava jezgre na savojni modul elastičnosti, ali veliki na savojnu čvrstoću. Budući da je cilj kod kompozitnih konstrukcija smanjenje mase u odnosu na konstrukcije napravljene pomoću konvencionalnih materijala, savojna svojstva dobivena eksperimentom su podijeljena s gustoćom uzoraka da bi se dobila specifična svojstva. Rezultati specifične savojne čvrstoće pokazali su da je korištenje gušće jezgre isplativo u pogledu performansi cijelog sendviča, za razliku od specifičnog savojnog modula elastičnosti gdje je situacija složenija. Rezultati su pokazali da za manji broj slojeva ojačanja (1 do 2) najveći iznos specifičnog savojnog modula elastičnosti imaju uzorci jezgre najmanje gustoće (51 IG-F), dok kod većeg broja slojeva u ljuskama (3 do 4) najbolji su se pokazali uzorci s jezgrom srednje gustoće (110 IG-F).

Osim kod uzoraka koji su prethodno opisani, savojna svojstva su ispitana i na pločama većih dimenzija čije je ispitivanje obavezno po pravilima Formula Student natjecanja ukoliko se želi izraditi kompozitna šasija. U svrhu tih ispitivanja, ploče su izrađene od strane podtima za razvoj monokoka uz veliku pomoć sponzora. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava ploča pokazali su ekvivalentnost čeličnoj konstrukciji kod tri od četiri ispitana uzorka i time je dokazana prikladnost korištenja takvih sendvič konstrukcija za izradu budućeg monokoka. Postupak vrednovanja rezultata ispitivanja pomoću radnih tablica prikazan je u cijelosti za svaki ispitani postav.

Osim eksperimentalnog ispitivanja jedan od ciljeva rada bio je napraviti model za računalne simulacije kako bi se odredio savojni modul elastičnosti i glavni uzrok loma uzoraka. Za rješavanje tog problema korištena je metoda konačnih elemenata u programskom paketu Abaqus. Rezultati računalne simulacije pokazali su dobro poklapanje s eksperimentalno

dobivenim rezultatima što znači da model pokazuje dobru korelaciju predviđenih uzroka loma sa stvarnim načinima popuštanja. Unatoč tome postoji mogućnost poboljšavanja modela dodavanjem plastičnih svojstava jezgri te kriterija inicijacije i propagacije oštećenja slojeva ojačanja. To uključuje značajno više istraživanja o modeliranju svojstava materijala koji pokazuju vrlo specifično ponašanje pri vlačnom i tlačnom naprezanju, što u ovom radu nije bilo moguće provesti.

LITERATURA

[1] HexWeb Honeycomb sandwich design technology, Hexcel composites, Duxford, 2000.

[2] Campbell F. C.: Structural composite materials, ASM International, 2010.

[3] Vinson J. R.: Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials, Springer, 2005.

[4] McLaren, https://cars.mclaren.com/featured-articles/barnard-first-carbon-chassis.html (pristupljeno 08.01.2019.)

[5] Miravete A.: ICCM/9 Metal Matrix Composites. Woodhead Publishing Limited, 1993.

[6] Weijermars W.: Mechanical behaviour of composite sandwich panels in bending after impact, diplomski rad, University of Twente, 2016.

[7] Penado F. E.: Effective elastic properties of honeycomb core with fiber-reinforced composite cells, Open Journal of Composite Materials, 2013.

[8] Gibson L. J., Ashby M. F.: Cellular solids – Structure and properties, Cambridge University Press, 1999.

[9] Arezoo S., Tagarielli V. L., Petrinic N.: The mechanical response of Rohacell foams at different length scales, Springer, 2011.

[10] Wood cores, https://netcomposites.com/guide-tools/guide/core-materials/wood-cores/ (pristupljeno 08.01.2019.)

[11] Allen H. G.: Analysis and design of structural sandwich panels, Pergamon Press, Oxford, 1969.

[12] Alfirević I.: Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga, 1989.

[13] ECSS: Space engineering, Insert design handbook, European Cooperation for Space Standardization, 2011.

[14] Trzesniowski M.: Rennwagen-technik – Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme, Springer, 2014.

[15] Thomsen O. T., Bozhevolnaya E., Lyckegaard A.: Localized effects in structural sandwich panels: practical occurence, analysis and design, Institute of Mechanical Engineering, Aalborg University, 2004.

[16] Riley W. B., George A. R.: Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis, Cornell University, 2002.

[17] Kumar V., Sinha S. K., Agarwal A. K.: Tribology of epoxy composites (graphene and graphite) coatings on steel in dry and lubricated conditions, Indian Institute of technology Kanpur, 2014.

[18] Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties, DIN EN ISO 14125:2011-05

[19] Hexcel Corporation: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexWeb_CRIII_DataSheet.pdf (pristupljeno 27.12.2018.)

[20] SHD Composites: https://shdcomposites.com/admin/resources/mtc510-tds.pdf (pristupljeno 27.12.2018.)

[21] Tomblin J., Sherraden J., Seneviratne W., Raju K. S.: Advanced General Aviation Transport Experiments, Toray T700SC-12K-50C/#2510 Plain Weave Fabric, National Institute for Aviation Research, Wichita, 2002.

[22] Solvay Composite Materials: http://catalogservice.solvay.com/downloadDocument?fileId=MDkwMTY2OWM4MDRlNjQyOQ==&fileName=VTM260%20Series_CM_EN.pdf&base=FAST (pristupljeno 27.12.2018.)

[23] Dassault Systemes: Analysis of Composite Materials with Abaqus, L9.13-L9.24., 2009

[24] Evonik Industries AG: https://www.rohacell.com/product/rohacell/en/products-services/ (pristupljeno 27.12.2018.)

PRILOZI

I. CD-R disc